



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

## **ESTUDO MINERALÓGICO EM ROCHAS DO STOCK ITAJU DO COLÔNIA, SUL DA BAHIA**

Adjanine Carvalho Santos Pimenta

Orientador: Prof. Dr. Herbet Conceição

Coorientadora: Profa. Dra. Maria de Lourdes da Silva Rosa

### **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias

São Cristóvão-SE  
2016

Adjanine Carvalho Santos Pimenta

**ESTUDO MINERALÓGICO EM ROCHAS DO STOCK ITAJU  
DO COLÔNIA, SUL DA BAHIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias da Universidade Federal de Sergipe, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geociências.

**Orientador:** Prof. Dr. Herbet Conceição

**Coorientadora:** Profa. Dra. M<sup>a</sup> de Lourdes da Silva Rosa

São Cristóvão–SE  
2016

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

P644e Pimenta, Adjanine Carvalho Santos  
Estudo mineralógico em rochas do Stock Itaju do Colônia, sul da Bahia / Adjanine Carvalho Santos Pimenta ; orientador Herbert Conceição. – São Cristóvão, 2016.  
100 f. : il.

Dissertação (mestrado em Geociências e Análise de Bacias) – Universidade Federal de Sergipe, 2016.

1. Geologia. 2. Nefelina sienito – Bahia. 3. Química mineralógica. I. Conceição, Herbert, orient. II. Título.

CDU 553.522(813.8)

# **ESTUDO MINERALÓGICO EM ROCHAS DO STOCK ITAJU DO COLÔNIA, SUL DA BAHIA**

por:

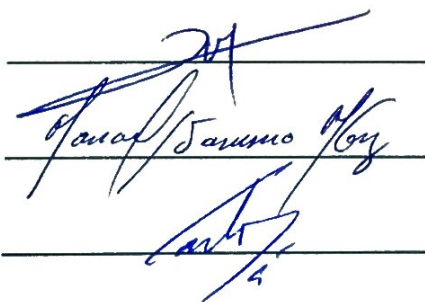
Adjanine Carvalho Santos Pimenta  
(Geóloga, Universidade Federal de Sergipe – 2013)

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de:

## **MESTRE EM GEOCIÊNCIAS**

### **BANCA EXAMINADORA:**



Dr. Herbet Conceição [Orientador – UFS]

Dr. Manoel Jerônimo Moreira Cruz [Membro Externo – UFBA]

Dr. Carlos Dinges Marques de Sá [Membro Interno – UFS]

Data da Defesa: 29/04/2016

## *Dedicatória*

Dedico este trabalho  
à Adalberto e Laucenise, amados pais,  
à Dinalva, Irene e Benedito amados avós e  
à Alberlan, irmão e amigo de todas as horas.  
Agradeço por todo amor, apoio e incentivo.

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, luz fundamental em minha vida, que ilumina todos os meus dias e me dá forças necessárias para ultrapassar dificuldades e seguir sempre confiante.

Agradeço aos meus pais Laucenise e Adalberto, aos meus avós Dinalva, Benedito e Irene, ao meu irmão Alberlan, e ao meu namorado Luann por todo amor e apoio dedicado a mim. Tê-los em minha vida me faz uma pessoa infinitamente feliz e agradecida a Deus por ter escolhido pessoas tão maravilhosas para cuidar de mim. O amor que sinto por vocês não tem explicação, tamanho ou distância.

Agradeço a todos os professores que contribuíram para a minha formação acadêmica. Levo grandes ensinamentos de todos. Meus mais sinceros agradecimentos à Prof<sup>a</sup> Lourdes e ao Prof<sup>o</sup> Herbet não somente pela orientação neste trabalho, mas por todas as horas que passamos juntos, momentos de verdadeiros aprendizados, não só de geologia, mas de vida.

Agradeço a todo o pessoal do Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral (LAPA), amigos com os quais eu aprendi muito. Considero uma grande felicidade ter feito parte desse grupo ao lado de todos vocês.

Agradeço à Universidade Federal de Sergipe (UFS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa de Apoio à Núcleos de Excelência (PRONEX – Geologia UFS), à Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC-SE) e ao Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral (LAPA), pelo apoio e suporte oferecidos no desenvolvimento dessa pesquisa.

## *Epígrafe*

Conheça todas as teorias,  
domine todas as técnicas,  
mas ao tocar uma alma humana  
seja apenas outra alma humana.

Carl Jung

## Resumo

O magmatismo alcalino no Estado da Bahia é caracterizado pela ocorrência de diversos corpos plutônicos que se localizam em diversas regiões do estado, com idades variando desde o arqueano até o proterozoico. Uma das expressões mais significativas desse magmatismo é a representada pela Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia. Dentre as intrusões desta província, destaca-se o *Stock* Itaju do Colônia, com cerca de 1km<sup>2</sup>, e predominantemente constituído por nefelina sienitos e sodalita sienitos. Atualmente, este *stock* é o único no Brasil onde existem depósitos econômicos de sodalita sienito de cor azul intensa, comercialmente conhecidos como “Granito Azul Bahia”. O presente trabalho reúne dados obtidos de diversas técnicas analíticas de caracterização mineralógica como microscopia eletrônica de varredura, química mineral e geoquímica de rochas. Vários minerais apresentados nesse estudo estão sendo descritos pela primeira vez em Itaju do Colônia, como por exemplo pirocloro, ancilita, bastnaesita, torita, keiviita, xenotímio e euxenita. As informações obtidas permitiram inferir a existência de um importante evento metassomático materializado pela presença de esfalerita, barita, galena, fluorita e fluorcarbonatos. Os dados geoquímicos de rocha confirmaram o caráter peralcalino miasquítico deste *stock*, sendo constatado um significativo enriquecimento de alguns elementos traços como Zr (até 1.520 ppm), Nb (até 470 ppm), Ta (até 79 ppm), Zn (75 ppm), Ce (44 ppm) e La (22 ppm). Os espectros de ETR são fracamente fracionados e marcados por anomalias negativas em Eu.

PALAVRAS CHAVE: MINERALOGIA, SIENITO, ITAJU DO COLÔNIA



## Abstract

The alkaline magmatism in the State of Bahia is characterized by the occurrence of several bodies that occur in different regions and ages. One of the most significant expressions of this magmatism is represented by the Alkaline Province South of Bahia. Among the intrusion of this province, there is the Itaju do Colônia Stock with about 1km<sup>2</sup> area, which consists predominantly of nepheline syenite and sodalite syenite. Currently, this stock is the only one in Brazil where there are economic deposits of sodalite syenite intense blue color, commercially known as 'Bahia Blue Granite'. This study brings together data from various analytical techniques mineralogical characterization as scanning electron microscopy, mineral chemistry analyses and rock geochemistry. Several minerals were first described by this study in Itaju do Colônia, such as pyrochlore, ancylite, bastnäsite, thorite, keiviite, xenotime and euxenite. The information obtained allowed us to infer the existence of an important metasomatic event materialized by the presence of sphalerite, barite, galena, fluorite and fluorcarbonates. Rock geochemistry analyses confirmed the miaskitic peralkaline character of this stock, and found a significant enrichment of some trace elements such as Zr (up to 1,520 ppm), Nb (up to 470 ppm), Th (up to 79 ppm), Zn (75 ppm), Ce (44 ppm) and La (22 ppm). The ETR spectra are weakly fractionated and marked by negative Eu anomalies.

KEYWORDS: MINERALOGY, SYENITE, ITAJU DO COLÔNIA

## Lista de Siglas

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais

CBPM – Companhia Baiana de Pesquisa Mineral

CEPLAC – Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CSF – Cratón do São Francisco

ETR – Elementos Terras Raras

FAPITEC-SE – Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe

FPP – Falha Planalto Potiraguá

LAPA – Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral

MEV - Microsonda Eletrônica de Varredura

PASEBA – Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia

PIIC – Província Itabuna-Itaju do Colônia

PRONEX - Programa de Apoio à Núcleos de Excelência

SIC – *Stock* Itaju do Colônia

TTG – Tonalito Trondhjemito Granodiorito

UFBA – Universidade Federal da Bahia

UFS – Universidade Federal de Sergipe

# Sumário

<b>Dedicatória</b>	iv
<b>Agradecimentos</b>	v
<b>Epígrafe</b>	vi
<b>Resumo</b>	vii
<b>Abstract</b>	viii
<b>Lista de Siglas</b>	ix
<b>Sumário</b>	x
<b>Lista de Figuras</b>	xiii
<b>Lista de Tabelas</b>	xv
<b>Lista de Anexos</b>	xvii

## Capítulo 1 – Introdução

1.1 Apresentação	2
1.2 Importância Econômica	3
1.3 Localização e Acesso	3
1.4 Motivações e Objetivos	5
1.5 Metodologia	5
1.5.1 Levantamento Bibliográfico	5
1.5.2 Seleção de Amostras	6
1.5.3 Etapa Laboratorial	6
1.5.4 Tratamento de Dados	6

## Capítulo 2 - Geologia Regional

2.1 Introdução	8
2.2 Magmatismo Alcalino no Estado da Bahia	8
2.2.1 Rochas Alcalinas Arqueanas	8
2.2.2 Rochas Alcalinas Paleoproterozoicas	8
2.2.3 Rochas Alcalinas Neoproterozóicas	9
2.3 Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia (PASEBA)	9
2.4 Embasamento	11
2.4.1 Complexo Itapetinga	11

2.4.2 Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá _____	12
2.5 Maciços Alcalinos _____	13
2.6 Diques _____	13
2.7 Grupo Rio Pardo _____	14
2.8 Coberturas Tércio-Quartenárias _____	14

### **Capítulo 3 - Geologia Local**

3.1 Introdução _____	16
3.2 Geologia do <i>Stock</i> Itaju do Colônia _____	16

### **Capítulo 4 - Metodologia e Procedimentos Analíticos**

4.1 Introdução _____	20
4.2 Microscópio Eletrônico de Varredura _____	20
4.2.1 Coluna do Equipamento _____	20
4.2.2 Câmara de Amostra _____	22
4.3 Princípio Teórico da Microscopia Eletrônica de Varredura _____	22
4.4 Interação Feixe-Amostra _____	23
4.4.1 Imagens de Elétrons Secundários (SE) _____	24
4.4.2 Imagens de Elétrons Retroespalhados (BSE) _____	24
4.5 Preparação de Amostras _____	25
4.6 Espectometria de Energia Dispersiva _____	25
4.7 Estudos por Microscopia Eletrônica de Varredura _____	26

### **Capítulo 5 – Química Mineral**

5.1 Introdução _____	29
5.2 Minerais Essenciais _____	30
5.2.1 Feldspatos Alcalinos _____	30
5.2.2 Sodalita _____	34
5.2.3 Micas _____	34
5.2.4 Analcima _____	37
5.3 Minerais Acessórios _____	41
5.3.1 Keiviita _____	41
5.3.2 Torita _____	41

5.3.3 Fluorita	44
5.3.4 Bastnasita	44
5.3.5 Ancilita	45
5.3.6 Xenotímio	45
5.3.7 Galena	50
5.3.8 Esfarelita	50
5.3.9 Barita	50
5.3.10 Magnetita	53
5.3.11 Euxenita	53
5.3.12 Pirocloro	53
5.4 Minerais Desconhecidos	63

## Capítulo 6 – Caracterização Geoquímica

6.1 Introdução	65
6.2 Classificação Química	65
6.2.1 Diagrama Total Álcalis <i>versus</i> Sílica – Currie (1976)	65
6.3 Relação K <sub>2</sub> O e Na <sub>2</sub> O	68
6.4 Composição Normativa	68
6.5 Diagramas de Variação	71
6.5.1 Elementos Maiores e Menores	71
6.5.2 Elementos Traços	71
6.6 Diagrama de Saturação em Alumínio	74
6.7 Espectro de Elementos Terras-Raras	74

## Capítulo 7 – Considerações Finais

7.1 Discussões	77
7.2 Conclusões	78

Referências Bibliográficas	81
----------------------------	----

# Lista de Figuras

## Capítulo 1 – Introdução

- Figura 1.1** Localização geográfica da área em estudo na América do Sul [A], Brasil e no Estado da Bahia [B]. 4

## Capítulo 2 – Geologia Regional

- Figura 2.1** Mapa Geológico simplificado da PASEBA, segundo Rosa *et al.* (2004). 10

## Capítulo 3 – Geologia Local

- Figura 3.1** Aspectos e texturas das principais rochas encontradas no Stock Itaju do Colônia. 17

## Capítulo 4 – Microscopia Eletrônica de Varredura

- Figura 4.1** Representação esquemática dos componentes do microscópio eletrônico de varredura, retirado de Kahn (2000). 21

## Capítulo 5 – Química Mineral

- Figura 5.1** Diagrama de temperatura de equilíbrio dos feldspatos com base nos parâmetros estabelecidos por Nekvasil & Burnham (1987). 33

- Figura 5.2** Diagrama Al-Mg-Fe aplicado a rochas do *Stock* Itaju do Colônia. A área demarcada em azul claro corresponde a amostras de Cabral (2008). 39

- Figura 5.3** Modos de ocorrência dos cristais de pirocloro. 57

- Figura 5.4** Diagrama ternário catiônico Ti-Nb-Ta para a classificação dos minerais do Supergrupo do Pirocloro, segundo Atencio *et al.* (2010). 59

- Figura 5.5** Variação de textura dos cristais de pirocloro em rocha do *Stock* Itaju do Colônia. 61

- Figura 5.6** Diagrama ternário catiônico Vacância-Ca-Na para classificação do estágio de cristalização dos cristais de pirocloro, segundo Nasraou & Bilal (2000). 61

## Capítulo 6 – Caracterização Geoquímica

<b>Figura 6.1</b>	Diagrama de classificação de rochas alcalinas segundo Currie (1976).	<b>67</b>
<b>Figura 6.2</b>	Diagrama $K_2O$ <i>versus</i> $Na_2O$ , para determinação do caráter sódico ou potássico de rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>69</b>
<b>Figura 6.3</b>	Diagrama de variação aplicada a elementos maiores em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>72</b>
<b>Figura 6.4</b>	Diagramas de variação aplicados a elementos traços em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>73</b>
<b>Figura 6.5</b>	Diagrama de proporções moleculares $Al_2O_3/Na_2O+K_2O$ <i>versus</i> $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$ de Maniar & Piccoli (1989), segundo os parâmetros gráficos de Shand (1943). A área em azul claro demarca área de abrangência das amostras de Cabral (2013).	<b>75</b>
<b>Figura 6.6</b>	Diagrama multielementar de elementos terras raras normalizados pelo condrito segundo Boynton (1984).	<b>75</b>

# Lista de Tabelas

## Capítulo 5 – Química Mineral

<b>Tabela 5.1</b>	Análises químicas representativas de cristais de albita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 8 oxigênios e 5 cátions.	<b>31</b>
<b>Tabela 5.2</b>	Análises químicas representativas de cristais de k-feldspatos em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 8 oxigênios e 5 cátions.	<b>32</b>
<b>Tabela 5.3</b>	Análises químicas representativas de cristais de sodalita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 24 oxigênios e 20 cátions.	<b>35</b>
<b>Tabela 5.4</b>	Análises químicas representativas de cristais de biotita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 22 oxigênios e 20 cátions.	<b>36</b>
<b>Tabela 5.5</b>	Análises químicas representativas de cristais de annita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 22 oxigênios e 20 cátions.	<b>38</b>
<b>Tabela 5.6</b>	Análises químicas representativas de cristais de analcima em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 96 oxigênios e 64 cátions.	<b>40</b>
<b>Tabela 5.7</b>	Análises químicas representativas de cristais de keiviita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 7 oxigênios e 4 cátions.	<b>42</b>
<b>Tabela 5.8</b>	Análises químicas representativas de cristais de torita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>43</b>
<b>Tabela 5.9</b>	Análises químicas representativas de cristais de fluorita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>46</b>
<b>Tabela 5.10</b>	Análises químicas representativas de cristais de bastnasita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>47</b>
<b>Tabela 5.11</b>	Análises químicas representativas de cristais de ancilita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 6 oxigênios e 3 cátions.	<b>48</b>
<b>Tabela 5.12</b>	Análises químicas representativas de cristais de xenotímio em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>49</b>



<b>Tabela 5.13</b>	Análises químicas representativas de cristais de galena em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>51</b>
<b>Tabela 5.14</b>	Análises químicas representativas de cristais de esfalerita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>51</b>
<b>Tabela 5.15</b>	Análises químicas representativas de cristais de barita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 4 oxigênios e 2 cátions.	<b>52</b>
<b>Tabela 5.16</b>	Análises químicas representativas de cristais de magnetita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 4 oxigênios e 3 cátions.	<b>54</b>
<b>Tabela 5.17</b>	Análises químicas representativas de cristais de euxenita em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>55</b>
<b>Tabela 5.18</b>	Análises químicas representativas de cristais de pirocloro em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 6 oxigênios e 4 cátions.	<b>58</b>
<b>Tabela 5.19</b>	Dados químicos representativos dos dois grupos que caracterizam a tendência evolucionária dos cristais de pirocloro.	<b>62</b>

## **Capítulo 6 – Caracterização Geoquímica**

<b>Tabela 6.1</b>	Dados de elementos maiores e traços em rochas do <i>Stock Itaju</i> do Colônia.	<b>66</b>
<b>Tabela 6.2</b>	Tabela de composição normativa.	<b>70</b>

## Lista de Anexos

<b>ANEXO 1</b> – Fase mineral rica em Elementos Terras Raras _____	91
<b>ANEXO 2</b> – Fase mineral rica em estrôncio _____	92
<b>ANEXO 3</b> – Análises químicas do óxido de estrôncio _____	94
<b>ANEXO 4</b> – Fase mineral rica em ferro e mangânes _____	96
<b>ANEXO 5</b> – Fase mineral rica em tálio e cobre _____	97
<b>ANEXO 6</b> – Análises químicas dos silicatos de ítrio e itérbio _____	98
<b>ANEXO 7</b> – Fase mineral rica em tório _____	99
<b>ANEXO 8</b> – Fase mineral rica em nióbio e tungstênio _____	100

Capítulo 1

# Introdução

Apresentação

Motivações e Objetivos

Importância Econômica

Localização e Acesso

Metodologia

### 1.1. Apresentação

O presente trabalho tem por foco o estudo da mineralogia e geoquímica do *Stock* Itaju do Colônia (SIC), intrusão alcalina predominantemente constituída por nefelina sienitos e sodalita sienitos. O *stock* em estudo faz parte do conjunto de corpos alcalinos que compõem a Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia (PASEBA), nomeada por Silva Filho *et al.* (1974) e atualmente, considerada a maior expressão brasileira do magmatismo alcalino de idade neoproterozoica.

Os primeiros estudos a respeito de rochas alcalinas neoproterozoicas no Sul do Estado da Bahia foram publicados a partir de 1960. Na década seguinte houve uma evolução do conhecimento da PASEBA resultando em importantes publicações. Dentre elas ressalta-se os boletins técnicos da CEPLAC e os trabalhos de Fujimori (1967), Barbosa de Deus (1972), Souto (1972), Cordani (1973) e Fujimori (1978).

Após um intervalo de aproximadamente duas décadas sem novos dados, o projeto 'Petrologia e Potencialidades Econômicas da Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia', desenvolvido pelo Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral da Universidade Federal da Bahia (UFBA), em parceria com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) e a Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), retomou os trabalhos e conseqüentemente a publicação de novas informações sobre os corpos alcalinos da PASEBA. Esse projeto viabilizou vários estudos abordando temas como: geocronologia (Rosa *et al.* 2003, Rosa *et al.* 2004, Rosa *et al.* 2005), petrologia (Peixoto 2005), petrografia e química mineral (Menezes 2005, Cabral 2008, Santos 2008).

Atualmente, o Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral da Universidade Federal de Sergipe (UFS) vem dando continuidade a esse trabalho, sendo responsável pela publicação de diversos trabalhos em rochas da PASEBA (Cabral 2013, Pimenta 2013, Pimenta *et al.* 2014, Pimenta *et al.* 2015, Santos 2013, Santos *et al.* 2014, Santos *et al.* 2015).

## **1.2. Importância Econômica**

Os sodalita sienitos presentes no *Stock* Itaju do Colônia são rochas bastante valorizadas, explotadas para a produção de peças ornamentais e artefatos de joalheria. A ocorrência deste tipo de rocha no mundo é restrita ao Brasil, Noruega e Zâmbia (Nery & Da Silva 2001).

A Bahia é o único estado brasileiro que produz o raríssimo sodalitito azul, de nome comercial 'Granito Azul Bahia', rocha ornamental de grande valor no mercado nacional e internacional.

O valor médio de 1 m<sup>3</sup> de sienito azul está diretamente relacionado ao aspecto visual da homogeneidade de cor desta rocha. Porções que possuem um baixo teor de sodalita apresentam, na lavra, valores em torno de US\$ 600/m<sup>3</sup>, enquanto porções com alto teor de sodalita podem custar mais de US\$ 2500/m<sup>3</sup> ainda na mina. Ao serem beneficiadas, sob a forma de placas polidas com 3 a 5 cm de espessura, essas rochas chegam a atingir US\$ 4000/m<sup>3</sup>.

## **1.3. Localização e Acesso**

O *stock* em estudo está localizado no município de Itaju do Colônia, a cerca de 25 km a sudoeste da sede municipal, a qual dista 722 Km de Aracaju e 534 Km de Salvador. A região de estudo está inserida na folha topográfica Itaju do Colônia (SD.24-Y-D-II), escala 1:100.000 da Sudene (1977).

O principal acesso, saindo da capital sergipana, é por meio da BR-101, sentido Sul, até a cidade de Itabuna. Desse ponto utiliza-se a BR-415 (trecho Itabuna-Ibicaraí) por aproximadamente 62 Km até o entroncamento com a BA-667, via que leva à cidade de Itaju do Colônia (Fig. 1). Existe igualmente a opção do transporte aéreo saindo de Aracaju até a cidade de Ilhéus. A partir de Ilhéus utiliza-se o acesso rodoviário até a cidade de Itabuna. Dessa cidade segue-se as vias descritas acima, percorrendo assim o mesmo trecho citado anteriormente.

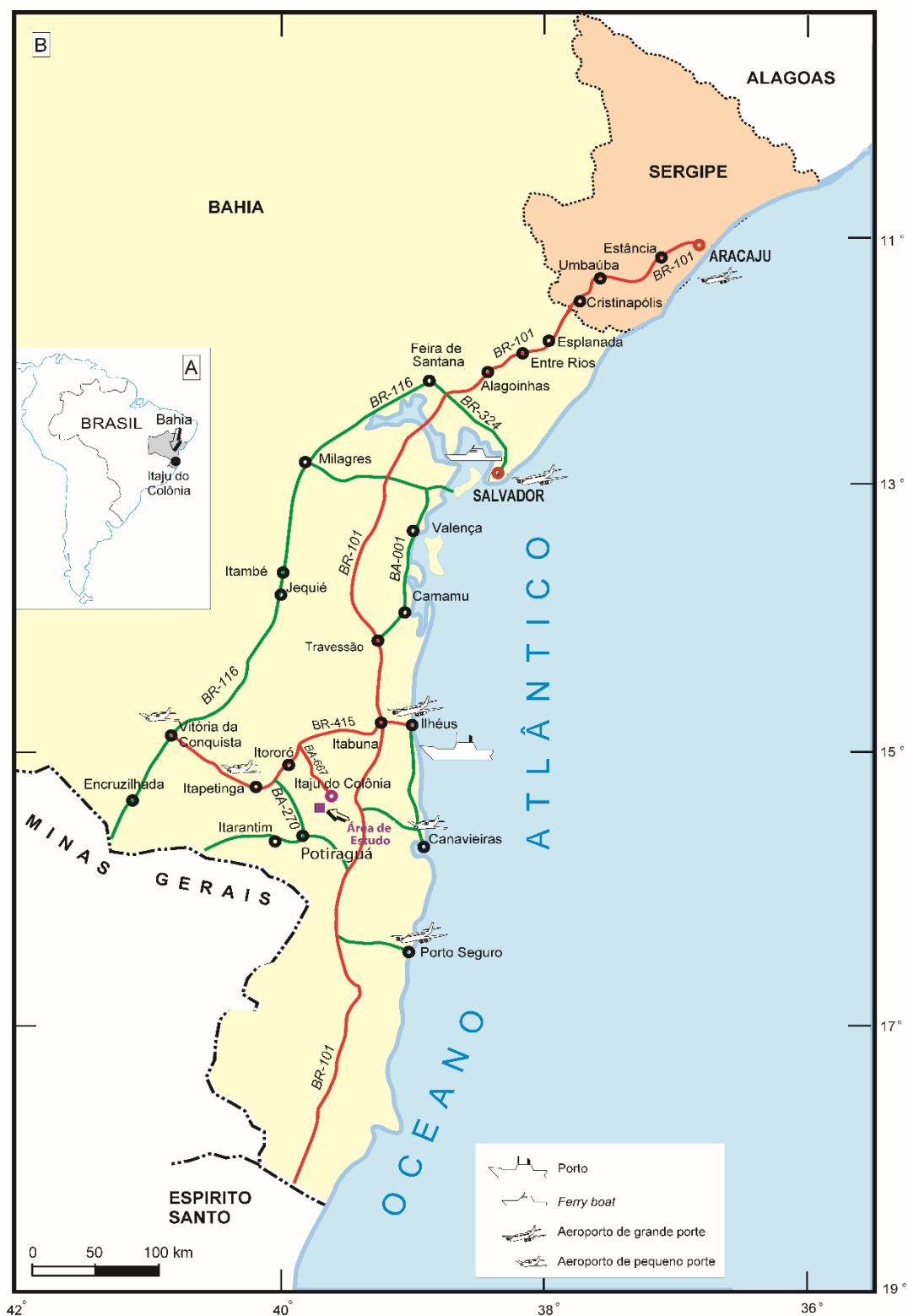


Figura 1. Localização geográfica da área em estudo na América do Sul [A], Brasil e no Estado da Bahia [B].

#### **1.4. Motivação e Objetivos**

O *Stock Itaju* do Colônia vem sendo continuamente explorado pelas indústrias de joalheria e peças ornamentais. A abertura de novas frentes de lavras nesse corpo tem exposto novas rochas, como uma importante franja de fenitos até então desconhecida. Essas recentes descobertas vêm permitindo a realização de estudos mais detalhados.

Essa dissertação teve por finalidade gerar novos dados geoquímicos e mineralógicos, que seguramente contribuem para melhorar a interpretação da evolução petrogenética e enriquecem o conhecimento acerca da diversidade mineralógica de rochas alcalinas tão particulares.

#### **1.5. Metodologia**

Para a execução desta pesquisa foram realizadas várias ações utilizando diferentes técnicas analíticas de investigação nas Geociências. Em linhas gerais essa pesquisa pode ser dividida em quatro etapas distintas: levantamento bibliográfico, seleção de amostras, etapa laboratorial e tratamento de dados.

##### **1.5.1. Levantamento Bibliográfico**

O levantamento bibliográfico desenvolveu-se durante toda a pesquisa, sendo construído de acordo com as temáticas abordadas em cada momento.

A primeira etapa consistiu na obtenção de dados sobre a geologia regional e local, de forma a melhor entender o contexto geológico no qual o objeto de estudo está inserido. Posteriormente, a etapa de pesquisa passou a ser a obtenção de dados e a partir desse momento buscou-se bibliografias a respeito dos métodos e princípios analíticos. Identificados os minerais, o foco passou a ser a leitura de conteúdos sobre as associações minerais identificadas e os processos petrogenéticos envolvidos em suas formações.

A principal ferramenta de acesso ao material bibliográfico foi portal de periódicos da CAPES. A partir do portal foram obtidos artigos científicos, dissertações, teses, relatórios técnicos e trabalhos de conclusão de curso.

#### **1.5.2. Seleção de Amostras**

As amostras escolhidas para estudo foram selecionadas a partir da análise do banco de amostras pertencentes ao Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral (LAPA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

#### **1.5.3. Etapa Laboratorial**

Nessa etapa as amostras selecionadas foram preparadas e analisadas. Cada amostra foi dividida em 3 partes com volumes iguais. A primeira delas foi enviada para a confecção de lâmina delgada polida para os estudos por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A segunda parte foi pulverizada para a realização de análises geoquímicas. Essas análises (elementos maiores, menores e traços) foram realizadas pela ACME *Laboratories Ltda.*, situada no Canadá. A dosagem dos elementos maiores, menores e alguns traços foi realizada por ICP OES (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) e a maioria dos elementos-traço por ICP MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*).

Por fim, uma terceira parte da amostra foi reservada em arquivo, para caso fosse necessário replicar alguma das etapas anteriores.

#### **1.5.4. Tratamento de Dados**

O tratamento dos dados mineralógicos e geoquímicos foi realizado utilizando-se dos seguintes softwares: Microsoft Excel® 2013, SolvCalc 2.0® (Shaoxiong & Nekvasil 1994) e Geochemical Data Toolkit® for Windows 2.3 (Janoušek et al. 2006).



Capítulo 2

# Geologia Regional

Introdução

Magmatismo Alcalino na Bahia

Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia

## **2.1. Introdução**

O *stock* Itaju do Colônia faz parte de um conjunto de corpos alcalinos situados na região sul do Estado da Bahia. Rochas ígneas alcalinas, incluindo nefelina sienitos e carbonatitos associados, compreendem uma pequena, mas importante parcela da crosta continental (Sørensen 2001).

## **2.2. Magmatismo Alcalino no Estado da Bahia**

A geologia do Estado da Bahia apresenta história complexa, sendo constituída por terrenos de diversas idades. Embora ocorra em pequeno volume, o magmatismo alcalino da Bahia é bem evidenciado, sendo relatadas ocorrências que datam do Arqueano até o Neoproterozoico (Conceição & Otero, 1996).

### **2.2.1. Rochas Alcalinas Arqueanas**

As rochas alcalinas arqueanas corresponde ao conjunto de rochas que apresentam o menor volume de dados. Neste contexto, destacam-se os granitos alcalinos do plutão de Pé-de-Serra (Marinho 1991), e os granulitos de afinidade shoshonítica e álcali-granitos descritos por Barbosa (1997).

### **2.2.2. Rochas Alcalinas Paleoproterozóicas**

O magmatismo alcalino paleoproterozoico é bem mais conhecido, sendo relatado nas porções leste e oeste do Estado. As principais ocorrências descritas são: o Sienito Itiúba (Conceição 1990, 1993), o Batólito Guanambi (Rosa *et al.* 2000), e a Província Alcalina de Campo Alegre de Lourdes. Suas rochas apresentam idades em torno de 2,1 Ga e correspondem a sienitos *hipersolvus* potássicos e ultrapotássicos, monzonitos potássicos e lamprófiros ultrapotássicos e granitos alcalinos (Conceição 1993).

### **2.2.3. Rochas Alcalinas Neoproterozóicas**

As rochas alcalinas neoproterozoicas da Bahia distribuem-se nas diversas faixas que circundam o Cráton do São Francisco (Conceição & Otero 1996). Na porção sul do Estado, estas rochas constituem a Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia (PASEBA), terminologia atribuída por Silva Filho *et al.* (1974).

### **2.3. Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia**

A Província Alcalina do Sul do Estado da Bahia, também denominada de PASEBA, possui cerca de 10.000 km<sup>2</sup>. Devido à suas dimensões, é considerada a mais importante expressão do magmatismo alcalino neoproterozoico do Brasil.

Segundo Rosa *et al.* (2007) a PASEBA constitui um magmatismo anarogênico, com intervalo entre 676 – 739 Ma. Este magmatismo alcalino sub-saturado em sílica caracteriza a existência de um período distensivo de aproximadamente 58 Ma neste setor do Cráton do São Francisco (CSF).

Esses dados alocam o magmatismo como pertencente ao período final de fragmentação do Supercontinente Rodínia, o que seria evidenciado pela geossutura alinhada NE-SW na qual a província está alojada (Rosa *et al.* 2005a) e pela estruturação *horst-gráben* da região (Pedreira 1999).

A geologia da província é bastante complexa sendo constituída por nefelina sienitos, monzonitos e por granitos alcalinos, esses últimos em menor volume. Sodalita sienitos e rochas máficas também ocorrem em um volume consideravelmente subordinado (Conceição & Otero 1996).

Os maciços alcalinos da província são de composição essencialmente sienítica, tendo como principais feldspatoides: nefelina e sodalita. Os principais corpos alcalinos que compõem a província são os batólitos Itabuna, Complexo Floresta Azul, Serra das Araras e Itarantim; e os *stocks* Rio Pardo, Serra da Gruta e Itaju do Colônia, sendo este último, o *stock* foco deste estudo (Fig. 2.1).

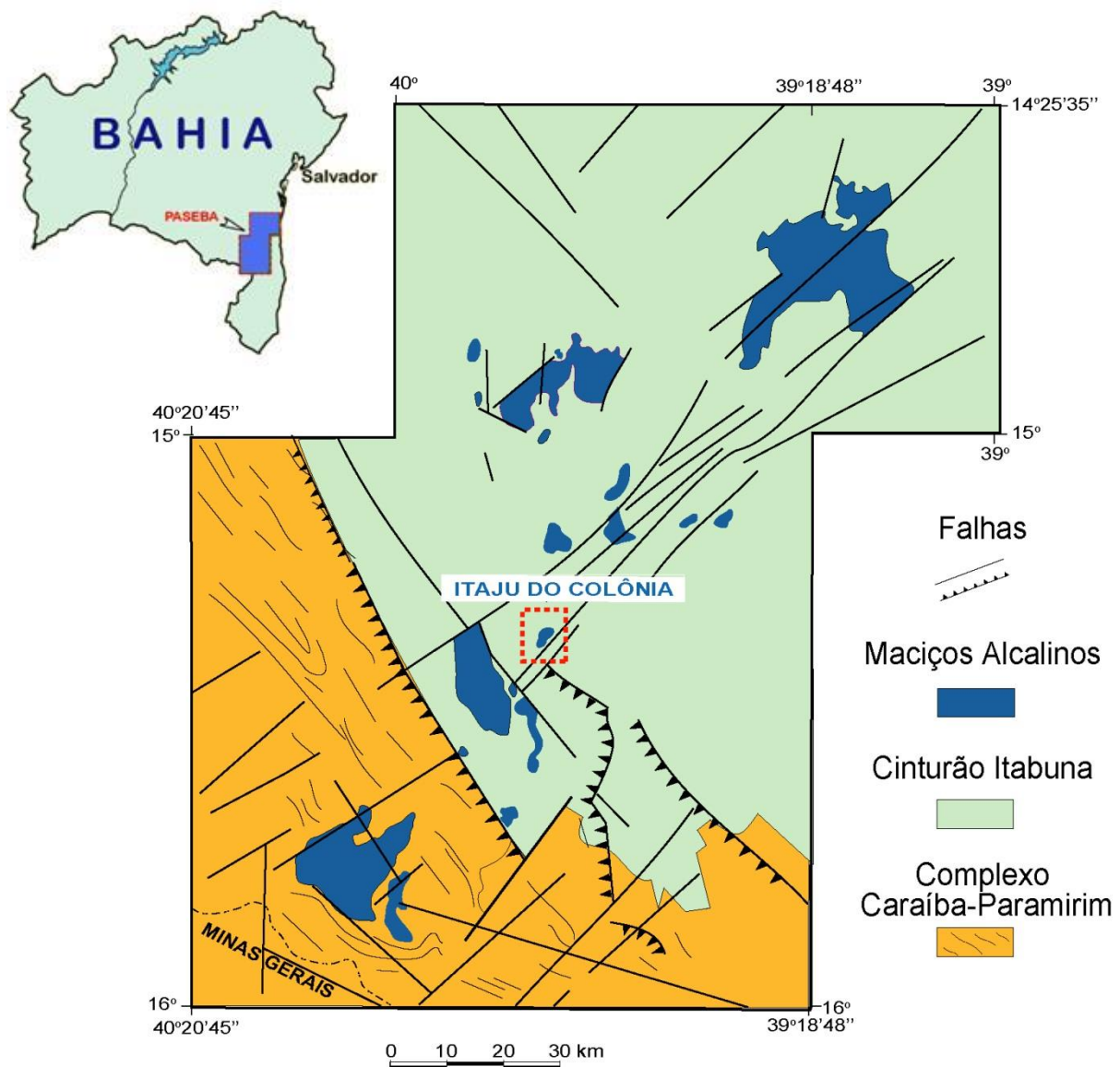


Figura 2.1: Mapa Geológico simplificado da PASEBA, segundo Rosa *et al.* (2005a).

O contato entre as rochas do embasamento e os maciços alcalinos possuem boa definição, característica interpretada por Rosa *et al.* (2005b) como resultante do alto contraste térmico, o que indicaria que as rochas expostas atualmente eram câmaras magmáticas anteriormente situadas a cerca de 6 a 8 km de profundidade.

## **2.4. Embasamento**

Os corpos alcalinos que constituem a PASEBA encontram-se encaixados em duas unidades geológicas distintas. O embasamento da porção sudoeste é formado por terrenos gnaíssico-migmatíticos do Complexo Itapetinga enquanto o embasamento da porção norte e central é composto por granulitos pertencentes ao Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá. Ambos os terrenos possuem idades arqueanas e paleoproterozoicas e são delimitados pela Falha Planalto-Potiraguá (FPP), estrutura com orientação NW-SE, associada a estruturação do Rifte Espinhaço, de idade mesoproterozoica.

### **2.4.1. Complexo Itapetinga**

O Complexo Itapetinga é constituído por um conjunto de gnaisses, geralmente migmatizados, com natureza sienó-granítica, monzó-granítica e álcali-feldspato granítica. Em seu trabalho, Paixão (2008) denota essas rochas como detentoras de bandamento metamórfico composicional de dimensões métricas a centimétricas. De acordo com Rosa *et al.* (2005c), os dados geoquímicos evidenciam a afinidade dessas rochas com suítes TTG, similares às da porção nordeste da Bahia.

A partir de estudos petrográficos e análises geoquímicas realizadas em rochas do Complexo Itapetinga, Paixão (2008) identifica nessas rochas a afinidade com séries cálcio-alcalinas de alto K e alcalinas, de caráter predominantemente peraluminoso. Baseado no percentual de sílica, as rochas foram classificadas como ácidas, apresentando  $\text{SiO}_2 > 66\%$ .

O metamorfismo ao qual o Complexo Itapetinga foi submetido, devido às colisões paleoproterozoicas, é alocado na Fácies Anfibólito. Esses eventos deformacionais foram responsáveis por promover a anatexia e migmatização das rochas com intensidades distintas. Gnaisses com feições miloníticas marcantes ocorrem retratando feições cisalhantes características do sistema de falhas Planalto-Potiraguá.

#### **2.4.2. Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá**

O embasamento do setor nordeste da PASEBA é composto por terrenos granulíticos polimetamórficos, os quais foram afetados pela tectônica neoproterozoica da Faixa Móvel Araçuaí, cujo clímax ocorreu a 550 Ma (Pedrosa-Soares *et al.* 2001). Os granulitos apresentam composição predominantemente intermediária a ácida.

O orógeno tem cerca de 800 km e faz parte do Cinturão Móvel Costeiro Atlântico (CMCA). O CMCA é uma grande estrutura presente ao longo da costa brasileira. Nas proximidades da cidade de Salvador, o cinturão bifurca-se em três ramos: um a norte, um a sul e outro a nordeste. O ramo nordeste foi denominado Cinturão Salvador-Esplanada (Oliveira Junior, 1990). O ramo norte foi denominado Cinturão Móvel Salvador-Curaçá - CMSC (Santos & Souza, 1985), enquanto o ramo sul foi denominado de Cinturão Itabuna (Figueiredo 1989).

A região meridional desse orógeno estabilizou-se à aproximadamente 2.1-2.0 Ga (Barbosa 1997). Essa porção possui foliação gnáissica, tendo orientação NE-SW como estrutura predominante. No segmento sul prevalece a ocorrência de granulitos tonalítico-trondhjemíticos do Neoarqueno e do Paleoproterozoico, sendo encontrados granulitos monzoníticos e monzodioríticos em menor volume (Barbosa *et al.* 2012).

Estudos constataram que a formação dos ramos norte e sul estariam relacionadas a compressão dos núcleos arqueanos Remanso e Serrinha. (Padilha & Melo 1991; Figueiredo & Barbosa 1993).

Devido as similaridades existentes entre ambos, Barbosa & Sabaté (2004) propõem que as porções norte e sul componham um único cinturão, denominado Orógeno Itabuna-Salvador Curaçá.

## **2.5. Maciços Alcalinos**

Os corpos alcalinos da PASEBA são resultantes de um magmatismo com assinatura mantélica com fonte tipo IOB (Rosa *et al.* 2005a) e encontram-se alinhados com direção NE-SW. De acordo com Mascarenhas (1979), a orientação desses corpos é atribuída a um conjunto de falhas profundas que controlaram a colocação destes magmas.

A intrusão dos magmas alcalinos responsáveis por formar a PASEBA é um assunto que gera discussões. Até o final da década de 90, Teixeira *et al.* (1997) associava a entrada dos maciços alcalinos ao período colisional da Faixa Araçuaí na porção sudeste do CSF.

A partir dos anos 2000, após uma série de datações, Rosa *et al.* (2003) atribui a geração dos maciços à processos anarogênicos correlacionáveis à formação do Rifte Rio Pardo.

## **2.6. Diques**

Uma característica notável nos maciços alcalinos que constituem a PASEBA é a presença de uma rede de diques que cortam os maciços. Segundo Brito Neves *et al.* (1980), os diques máficos estão associados a um processo extensional, possivelmente correlacionado ao Sistema Espinhaço.

Com base em dados sintetizados por Barbosa *et al.* (2012), os diques máficos que ocorrem nas proximidades da cidade de Itaju do Colônia são toleióticos, tendo como característica um considerável enriquecimento de  $\text{FeO}_t$  quando comparado ao  $\text{MgO}$  e apresentando baixas razões  $\text{SiO}_2/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ .

Os padrões de distribuição dos Elementos Terras Raras ocorrem mediamente fracionados, sendo possível observar um enriquecimento dos ETR's leves em relação aos ETR's pesados.

## **2.7. Grupo Rio Pardo**

Grupo Rio Pardo é constituído por um pacote metassedimentar pelítico-carbonático formado, segundo Pedreira (1999), a partir de um sistema *pull-apart*, sendo atribuídas ao Mesoproterozoico, de acordo com Trompette (1994).

Diversos estudos anteriores tentaram organizar o empilhamento estratigráfico deste grupo. Na coluna estratigráfica proposta por Pedreira (1999), posicionada na base do Grupo Rio Pardo, tem-se a Formação Panelinha, seguida pelas formações Camacan, Água Preta, Santa Maria Eterna e Serra do Paraíso, estando esta última situada no topo da sequência. Atualmente a Formação Salobro não é mais considerada como um integrante do Grupo Rio Pardo.

## **2.8. Coberturas Tércio-Quartenárias**

A cobertura superficial é composta por sedimentos inconsolidados imaturos, sendo a fração areia a granulação dominante, mas com ocorrência de níveis conglomeráticos e argilosos. Os depósitos são de carácter aluvional, formados nas planícies de inundação dos principais rios da região.



Capítulo 3

# Geologia Local

Geologia do *Stock* Itaju do Colônia

### 3.1 Geologia do *Stock Itaju do Colônia*

O *stock* corresponde a um corpo de formato elipsoidal, com área aflorante de 1km<sup>2</sup>, encaixado em metamorfitos arqueano-paleoproerozoicos do Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá. De acordo com Rosa *et al.* (2005a), os contatos com as encaixantes fazem-se de forma brusca, sendo frequentemente marcados pela presença de diques de sienitos.

Seu eixo maior possui aproximadamente 1.350 m e encontra-se alinhado com direção N-S. Seguindo esta mesma orientação, encontra-se na porção leste do corpo uma faixa composta essencialmente por sodalitito de cor azul intensa. Trata-se de uma faixa de espessura variável, podendo atingir de 4 a 6 metros. A ocorrência dessa faixa torna esse *stock* a maior reserva brasileira de sodalita-sienito de cor azul intensa.

Em suas publicações, Rosa *et al.* (2005a) e Cabral (2008), descrevem o *stock* como sendo essencialmente constituído por rochas *foid* sieníticas com aspecto “pintado”, tendo como tonalidades dominantes o azul e branco, cores que são atribuídas respectivamente à sodalita e à albita juntamente com feldspato alcalino. Colorações esverdeadas e preta também ocorrem sendo descritas como resultantes das concentrações de aegerina associada com nefelina, e da presença de biotita nessas rochas (Figura 3.1).

Segundo Fujimori (1978), o *stock* é constituído por rochas alcalinas do tipo miasquítico, as quais apresentam teores extremamente baixos de CaO e MgO. Em seu trabalho ele sugere que a formação dessas rochas estaria condicionada à fusão parcial de algumas camadas de uma sequência sedimentar, a qual seria essencialmente uma mistura de evaporitos e sedimentos argilosos submetida a condições de ultrametamorfismo. Até então, estudos anteriores, com o de Daly (1910) e Holmes (1950), atribuíam que a formação dessas rochas estaria associada a processos de cristalização fracionada de magmas básicos ou assimilação de calcários por magmas ácido e básico.



Figura 3.1 Aspectos e texturas das principais rochas encontradas no *Stock* Itaju do Colônia.

Estudos mais recentes (Oliveira 2003; Cunha 2003) apresentam duas hipóteses para a geração dos sodalita sienitos. A primeira propõe a cristalização magmática tardia semelhante aos processos observados no Batólito Itarantim, e a segunda hipótese estaria relacionada aos processos metassomáticos responsáveis pela mineralização localizada devido à ação de fluidos alcalinos miasquíticos, ricos em cloretos, os quais interagiriam com nefelina sienito cristalizando assim a sodalita, às custas da nefelina.

A partir do estudo da petrografia das rochas do SIC, Cabral (2008) infere que alguns dos minerais estudados seriam resultantes da interação dos fluidos com a nefelina. A cancrinita se forma a partir da desestabilização da nefelina por fluido rico em CO<sub>2</sub>, responsável igualmente pela cristalização da calcita. Atribui-se a formação da sodalita à interação da nefelina com um fluido peralcalalino sódico rico em cloretos.

Essas rochas possuem, além de sodalita, cancrinita e carbonato, minerais como feldspato alcalino pertítico, aegerina, nefelina, albita, biotita, mica branca e minerais acessórios como zircão, titanita e minerais opacos.

A presença de cristais de titanita, um mineral acessório comum nessas rochas, permitiu que fosse realizada uma série de análises isotópicas utilizando o método U-Pb, a partir das quais obteve-se a idade de 732±8 Ma, interpretada como a idade de cristalização dos sodalita-litchfielditos do *Stock Itaju* do Colônia (Rosa et al. 2005a). A correlação desses dados com outros estudos geocronológicos realizados em diferentes maciços alcalinos pertencentes à PASEBA, permitiu identificar que o *Stock Itaju* do Colônia representa o sítio mineralizado mais velho da província.

Capítulo 4

# Microscopia Eletrônica de Varredura

Introdução

Princípio Teórico

Interação Feixe-Amostra

Espectometria de Energia Dispersiva

Estudos por Microscopia Eletrônica de Varredura

## **4.1 Introdução**

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características micro-estruturais de objetos sólidos (Goldstein & Newbury 2003), sendo aplicado em diversos campos do conhecimento, como engenharia e ciências dos materiais, ciências biológicas, áreas das geociências, engenharia de minas e engenharia metalúrgica.

A principal razão de sua utilidade deve-se a sua capacidade de produzir imagens ampliadas e com alta resolução. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento que permite que a superfície de uma amostra seja ampliada até 300.000 vezes, atingindo valores da ordem de 2 a 5 nanômetros.

A imagem criada a partir do MEV, denominada imagem eletrônica de varredura, possui uma aparência tridimensional característica, sendo útil para avaliar a estrutura superficial de uma dada amostra. Essas imagens são formadas pela incidência de um feixe de elétrons sobre o material, sob condições de vácuo. Dessa maneira, considera-se que a imagem eletrônica de varredura possui caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, após a colisão com o material analisado.

## **4.2 Microscópio Eletrônico de Varredura**

O microscópio eletrônico de varredura é composto por duas partes principais: a coluna e a câmara da amostra.

### **4.2.1 Coluna do Equipamento**

Posicionada na porção superior do equipamento, a coluna comporta em seu interior o canhão ou fonte de elétrons, o ânodo ou eletrodo, as lentes condensadoras, o sistema de varredura e a lente objetiva. Todos os componentes encontram-se alinhados de forma que exista um eixo comum a todas as partes, conforme observado na figura 4.

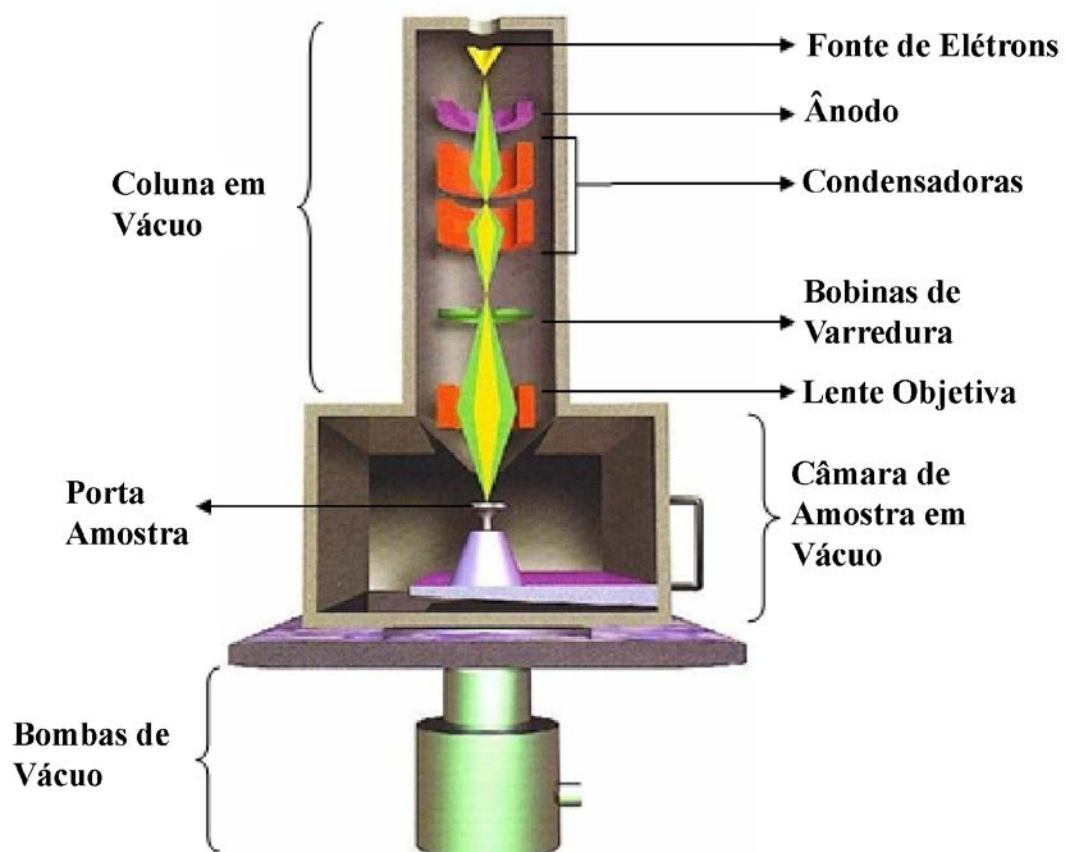


Figura 4: Representação esquemática dos componentes do microscópio eletrônico de varredura, retirado de Kahn (2000).

#### **4.2.2 Câmara de Amostra**

A câmara de amostra localiza-se logo abaixo da coluna. Nela estão contidos os detectores - responsáveis por captar os sinais gerados pela interação do feixe de elétrons com a amostra – e o porta amostra, acessório no qual são colocadas as amostras a serem analisadas. Normalmente, o porta amostra é encaixado sobre um suporte motorizado, que possibilita a rotação e movimentação da amostra em três eixos (x, y e z).

Coluna e câmara são submetidas às condições de vácuo, de maneira a evitar que os elétrons gerados no topo da coluna percam energia, devido ao choque com partículas presentes no ar, durante o trajeto em direção à amostra.

#### **4.3 Princípio Teórico**

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar, que pode ser de tungstênio ou hexaboreto de lantânio ( $\text{LaB}_6$ ). O filamento de  $\text{LaB}_6$  fornece uma maior densidade de corrente, em temperatura inferior à do filamento de tungstênio, além de apresentar uma vida útil substancialmente superior. Em contrapartida, a utilização de  $\text{LaB}_6$  requer condições de vácuo de magnitude superior às aquelas requeridas pelo filamento de tungstênio. Normalmente o tungstênio é usado por ter menor custo e por ser um metal com alto ponto de fusão e mais baixa pressão de vapor.

O filamento é submetido à uma diferença de potencial, que pode variar de 5 a 30 kV. Essa variação de voltagem provoca o aquecimento do filamento e a variação da aceleração dos elétrons, que acabam desprendendo-se do filamento e sendo emitidos termo-ionicamente.

O filamento age como cátodo, liberando elétrons. Os elétrons gerados, são fortemente atraídos por um eletrodo positivo (ânodo), resultando no deslocamento e aceleração destes elétrons sob a forma de um feixe o qual normalmente têm uma energia que varia de 0,5 keV até 100keV.



Após adquirirem aceleração, os elétrons deslocam-se ao longo da coluna, em direção à amostra. Durante esse percurso, o feixe atravessa uma série de lentes eletromagnéticas, sendo cada uma delas responsável por um processo específico.

A correção do percurso do feixe é realizada por lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. Após atravessar o par de lentes condensadoras, o feixe segue através de um conjunto de bobinas de varredura e pares de placas de deflexão, responsáveis por deslocar o feixe, horizontal e verticalmente, fazendo assim com que ele varra uma área retangular da superfície da amostra.

Transpostas as bobinas de varredura, o feixe passa, por fim, através da lente objetiva, último ajuste antes que o feixe de elétrons adentre a câmara de amostra e atinja a superfície do material. A lente objetiva tem por função regular o diâmetro do feixe de elétrons de forma a obter-se um ponto focal muito fino, com diâmetro variando de 0,28  $\mu\text{m}$  a 0,84  $\mu\text{m}$ .

#### **4.4 Interação Feixe-Amostra**

O feixe de elétrons primários, ao atingir a superfície do material, interage com a amostra excitando seus átomos. O volume de material excitado pelos elétrons primários é conhecido como volume de interação, tem formato de gota e profundidade variando entre 100 nm até 5  $\mu\text{m}$ . O seu tamanho está diretamente relacionado à energia dos elétrons, ao número atômico dos átomos da amostra e à densidade da amostra.

A interação entre o feixe de elétrons e a amostra poderá ser de dois tipos: espalhamento elástico e espalhamento inelástico. No espalhamento elástico, ao chocar-se com a amostra, os elétrons mudam de trajetória sem alterar sua energia cinética inicial. Esse processo é responsável pela geração de elétrons retroespalhados. No espalhamento inelástico, ao chocar-se com a amostra, os elétrons perdem energia cinética por dispersão e absorção. Esse processo é responsável pela geração de elétrons secundários, elétrons Auger e raios-x característicos.

A interação feixe-amostra gera um amplo espectro de radiações e partículas como: fótons, elétrons secundários, elétrons retroespalhados, elétrons Auger, raios-x Bremsstrahlung, raios-x característicos, radiação eletromagnética na região do infravermelho, do visível e do ultravioleta.

Cada espécie de radiação fornece um tipo de informação que pode estar relacionada à composição, à topografia, à cristalografia, ao potencial elétrico e campos magnéticos locais, entre inúmeras outras características. Para cada tipo de emissão é necessário um detector específico que deverá ser acoplado à câmara de amostra.

Na microscopia eletrônica de varredura, os sinais de maior interesse referem-se usualmente às imagens de elétrons secundários e de elétrons retroespalhados.

#### **4.4.1 Imagens de Elétrons Secundários**

As imagens de elétrons secundários, SE (*secondary electrons*), são imagens de alta resolução, formadas a partir de elétrons secundários. Esses elétrons são bastante superficiais, característica que os tornam uma excelente alternativa para visualização da topografia da amostra. Eles possuem baixa energia de ligação, sendo ejetados no momento da colisão do feixe primário com a superfície da amostra. Devido a sua baixa energia, esses elétrons são facilmente coletados pelo detector, gerando assim imagens de alta resolução.

#### **4.4.2 Imagens de Elétrons Retroespalhados (BSE)**

As imagens de elétrons retroespalhados, BSE (*backscattering electrons*), são geradas pela emissão destes elétrons. Grande parte desses elétrons são defletidos elasticamente, ou seja, conservam a energia cinética do feixe incidente. A elevada energia desses elétrons dificulta seu processo de coleta e detecção, o que resulta em imagens de menor resolução, quando comparadas com as imagens SE.

A principal característica das imagens BSE é sua capacidade de demonstrar diferenças composicionais na região ionizada. Essas diferenças são representadas por tons de cinza, onde os tons claros correspondem às porções constituídas por elementos com número atômico relativamente maior, em comparação com as regiões de tonalidade mais escura.

#### **4.5 Preparação de Amostras**

As análises podem ser realizadas em lâminas delgadas polidas ou secções polidas. As lâminas delgado-polidas são preparadas segundo a mesma técnica adotada para a microscopia petrográfica convencional diferindo, contudo, pela ausência de lamínula. Já as secções polidas são confeccionadas com base nos mesmos procedimentos adotados para microscopia de minérios.

Um bom polimento é condição imprescindível para uma boa análise. Quanto mais destituída de relevo for a superfície da amostra, menor será a imprecisão analítica decorrente da absorção desigual de raios-x.

Espécimes metálicas não exigem nenhuma preparação especial, além do seccionamento necessário para caber na câmara de amostras. No entanto, espécimes sólidos não condutivos devem ser cobertos com uma camada de material eletricamente condutivo. Essa cobertura é necessária para prevenir a acumulação de campos elétricos estáticos. As principais substâncias utilizadas são ouro, paládio, platina, tungstênio e grafite.

#### **4.6 Espectrometria de Energia Dispersiva**

O espectrômetro de energia dispersiva é comumente denominado de EDS, termo derivado da expressão *energy dispersive system*. O EDS tornou-se um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais, por possibilitar a determinação da composição qualitativa e semi-quantitativa de substâncias sólidas, a partir da emissão de raios-x característicos.

Sempre que um feixe incide sobre a superfície de um material, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, os elétrons liberam a energia adquirida sob a forma de raios-x característicos. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia emitida por esse elétron. Como elétrons de diferentes tipos de átomos possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar a composição do material analisado.

O uso em conjunto do EDS com o MEV é de grande importância na caracterização de materiais geológicos. Enquanto o MEV proporciona nítidas imagens, o EDS permite estimar sua composição. O equipamento ainda permite o mapeamento da distribuição de elementos químicos numa determinada região da amostra, gerando assim perfis e mapas composicionais.

Uma das principais vantagens do uso do MEV associado ao EDS consiste na rapidez e facilidade na obtenção de dados químicos. Todo o procedimento é integralmente operacionalizado de maneira simples, via computador, em ambiente Windows, apresentando assim uma relação custo-benefício significativamente inferior, comparada à outras técnicas. Outra vantagem é o diâmetro reduzido do feixe incidente que permite a determinação da composição mineral em amostras de tamanhos muito reduzidos ( $< 5 \mu\text{m}$ ), resultando em uma análise bastante pontual.

No entanto, são dosados apenas elementos químicos com massa atômica superior ao do boro, sendo detectados apenas os elementos que estejam presentes em concentração superior a 1%.

#### **4.7 Estudos por Microscopia Eletrônica de Varredura**

Os estudos em microscopia eletrônica iniciaram-se logo após a etapa de metalização das lâminas delgado-polidas. As lâminas foram metalizadas com carbono, utilizando o metalizador Quorum®, modelo - Q 150R ES.

As imagens eletrônicas foram obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura de marca Tescan®, modelo Vega3, tendo acoplado detectores de elétrons secundários (SE) e elétrons retroespalhados (BSE). As composições químicas pontuais dos minerais apresentados nesse estudo foram obtidas utilizando-se espectrômetro de energia dispersiva (EDS) de marca Oxford Instruments®, modelo - EDS x-ACT.

As condições analíticas do MEV foram vácuo de  $1,9 \times 10^{-3}$  Pa na coluna, e de  $1,5 \times 10^{-3}$  Pa na câmara de amostras. A corrente do feixe elétrons foi de 15Kv, com tensão variando de 15 nA a 20 nA. As dimensões do feixe de elétrons variaram de 500 nm até 890 nm e o tempo médio de contagem do EDS foi de 80 segundos. O erro médio das terminações químicas pontuais varia de 5% a 10%.

Capítulo 5

# Química Mineral

Introdução

Minerais Essenciais

Minerais Acessórios

### 5.1. Introdução

Os estudos por microscopia eletrônica de varredura foram uma importante ferramenta na determinação da composição química das principais fases minerais. Além dos minerais essenciais, foram diagnosticadas dezesseis espécies acessórias.

Neste capítulo são apresentados os dados químicos referentes as amostras estudadas. A partir desses dados foi possível calcular-se a fórmula estrutural dos minerais analisados e nomeá-los de acordo com esses cálculos.

O cálculo das fórmulas estruturais dos minerais foi realizado de acordo com os seguintes parâmetros:

- **Feldspatos** – fórmulas estruturais calculadas com base em 8 oxigênios e 5 cátions. Os pólos puros foram obtidos a partir do conteúdo dos íons Ca, Na, K e Ba, após o cálculo da fórmula estrutural de acordo com Deer *et al.* (2013).
- **Sodalita** - fórmula estrutural calculada com base em 24 oxigênios e 20 cátions, segundo as recomendações de Deer *et al.* (2013).
- **Biotita e Annita** – fórmula estrutural calculada com base em 22 oxigênios e 20 cátions, segundo as recomendações de Deer *et al.* (2013).
- **Analcima** - fórmula estrutural calculada com base em 96 oxigênios e 64 cátions, segundo as recomendações de Deer *et al.* (2013).
- **Keiviita** – fórmula estrutural calculada com base em 7 oxigênios e 4 cátions, segundo as recomendações de Deer *et al.* (2013).
- **Magnetita** - fórmula estrutural calculada com base em 4 oxigênios e 3 cátions, segundo as recomendações de Deer *et al.* (2013).
- **Pirocloro** – fórmula estrutural calculada com base em 6 oxigênios e 4 cátions, utilizando-se das recomendações de Atencio *et al.* (2010).
- **Ancilita** – fórmula estrutural calculada com base em 6 oxigênios e 3 cátions, segundo as recomendações de Deer *et al.* (2013).
- **Barita** – fórmula estrutural calculada com base em 4 oxigênios e 2 cátions, segundo as recomendações de Deer *et al.* (2013).

Para tratamento dos dados químicos de minerais foram utilizados *softwares* específicos, assim como planilhas eletrônicas de cálculos a fim de estabelecer a nomenclatura dos minerais e a evolução química das rochas. São eles:

- SovCalc® 2.0 (Shaoxing & Nekvasil 1994) para estimativa de temperatura de cristalização dos feldspatos alcalinos;
- Software Ilmat® (Lepage 2003) para a quantificação da valência do ferro;

As composições químicas mais representativas dos minerais identificados estão dispostas nas tabelas seguintes. As planilhas completas, contendo todos os dados analisados estão reunidas em anexo ao final do volume.

## **5.2. Minerais Essenciais**

### **5.2.1. Feldspatos Alcalinos**

As análises constataram que os cristais de feldspatos alcalinos presentes nessas rochas correspondem aos extremos composicionais de natureza sódica e potássica.

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os dados referentes aos cristais de feldspato alcalino. Nela estão representados os valores da composição química obtidos por EDS e as proporções de albita e K-feldspato que foram calculadas.

A albita (Ab) é um membro quase puro (98,31-100,0%) enquanto as proporções de Ortoclásio (Or) destas albitas variam entre 0 para 1,7 mol%. Esses cristais não apresentaram valores significativos de Anortita (An). Os K-feldspatos contêm pequenas quantidades de componente Ab (varia entre 1,8 e 8,9 mol%), não existindo quantidades significativas do componente An.



Tabela 5.1: Análises químicas representativas de cristais de albita em rochas do Stock Itaju do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 8 oxigênios e 5 cátions.

Lâmina	FH3	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1
Análise	Sp55-5	Sp59-7	Sp61-7	Sp85-7	Sp110-7	Sp15-8	Sp95-8	Sp27-9	Sp03-10	Sp85-10	Sp11-11	Sp40-11	Sp116-11	Sp68-12	Sp72-12	Sp166-12	Sp168-12	
SiO <sub>2</sub>	68,1	68,4	68,6	68,6	68,7	68,4	68,5	68,5	68,7	68,6	68,4	68,5	68,4	68,7	68,1	68,7	68,5	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,2	19,7	19,7	19,7	19,5	19,8	19,7	19,7	19,6	19,6	19,8	19,7	19,8	19,6	20,3	19,4	19,7	
Na <sub>2</sub> O	11,7	11,7	11,7	11,7	11,8	11,8	11,8	11,8	11,7	11,8	11,8	11,8	11,8	11,7	11,6	11,7	11,8	
K <sub>2</sub> O		0,2														0,2		
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Si	2,973	2,989	2,993	2,993	2,998	2,986	2,990	2,990	2,997	2,994	2,986	2,990	2,986	2,997	2,972	3,000	2,990	
Al	1,039	1,015	1,013	1,013	1,003	1,019	1,014	1,014	1,008	1,008	1,019	1,014	1,019	1,008	1,044	0,999	1,014	
Na	0,990	0,991	0,990	0,990	0,999	0,999	0,999	0,999	0,990	0,999	0,999	0,999	0,999	0,990	0,981	0,991	0,999	
K	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	
Total	5,003	5,005	4,996	4,996	5,000	5,004	5,002	5,002	4,994	5,001	5,004	5,002	5,004	4,994	4,997	5,001	5,002	
%Or	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	
%Ab	100,0	98,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,9	100,0	
%An	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Tabela 5.2: Análises químicas representativas de cristais de K-feldspatos em rochas do *Stock Itaju do Colônia*. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 8 oxigênios e 5 cátions.

Lâmina Análise	FH3 Sp210-3	FH3 Sp215-3	FH3 Sp15-4	FH3 Sp26-4	FH3 Sp65-4	FH3 Sp73-4	FH3 Sp93-4	FH3 Sp09-5	FH3 Sp17-5	FH3 Sp29-5	FH1 Sp08-7	FH1 Sp99-7	FH4 Sp01-9	FH1 Sp26-12	FH1 Sp94-12	FH1 Sp106-12
SiO <sub>2</sub>	64,6	64,5	58,7	64,5	64,5	64,4	64,4	64,4	64,7	64,6	64,6	64,7	64,4	64,9	64,6	64,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,9	18,7	17,1	18,8	18,6	18,9	19,1	18,8	18,6	18,7	18,7	18,5	19,1	18,3	18,5	18,5
Na <sub>2</sub> O	1	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2
K <sub>2</sub> O	15,5	16,4	14,9	16,3	16,6	16,3	16,2	16,4	16,1	16,2	16,4	16,6	16,2	16,5	16,6	16,6
Total	100	100	91,1	100	100	100	100,1	100	100	100	100	100,1	100,1	100	100	100
Si	2,98	2,98	2,98	2,98	2,99	2,98	2,97	2,98	2,99	2,99	2,99	2,99	2,97	3,00	2,99	2,99
Al	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02	1,03	1,04	1,03	1,01	1,02	1,02	1,01	1,04	1,00	1,01	1,01
Na	0,09	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02
K	0,91	0,97	0,97	0,96	0,98	0,96	0,95	0,97	0,95	0,96	0,97	0,98	0,95	0,97	0,98	0,98
Total	5,01	5,01	5,01	5,00	5,01	5,01	5,00	5,01	5,01	5,00	5,00	5,01	5,00	5,00	5,01	5,00
%Or	91,07	96,42	96,08	96,40	97,33	96,40	96,38	96,42	94,64	95,52	97,29	97,33	96,38	97,31	97,33	98,20
%Ab	8,93	3,58	3,92	3,60	2,67	3,60	3,62	3,58	5,36	4,48	2,71	2,67	3,62	2,69	2,67	1,80
%An	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

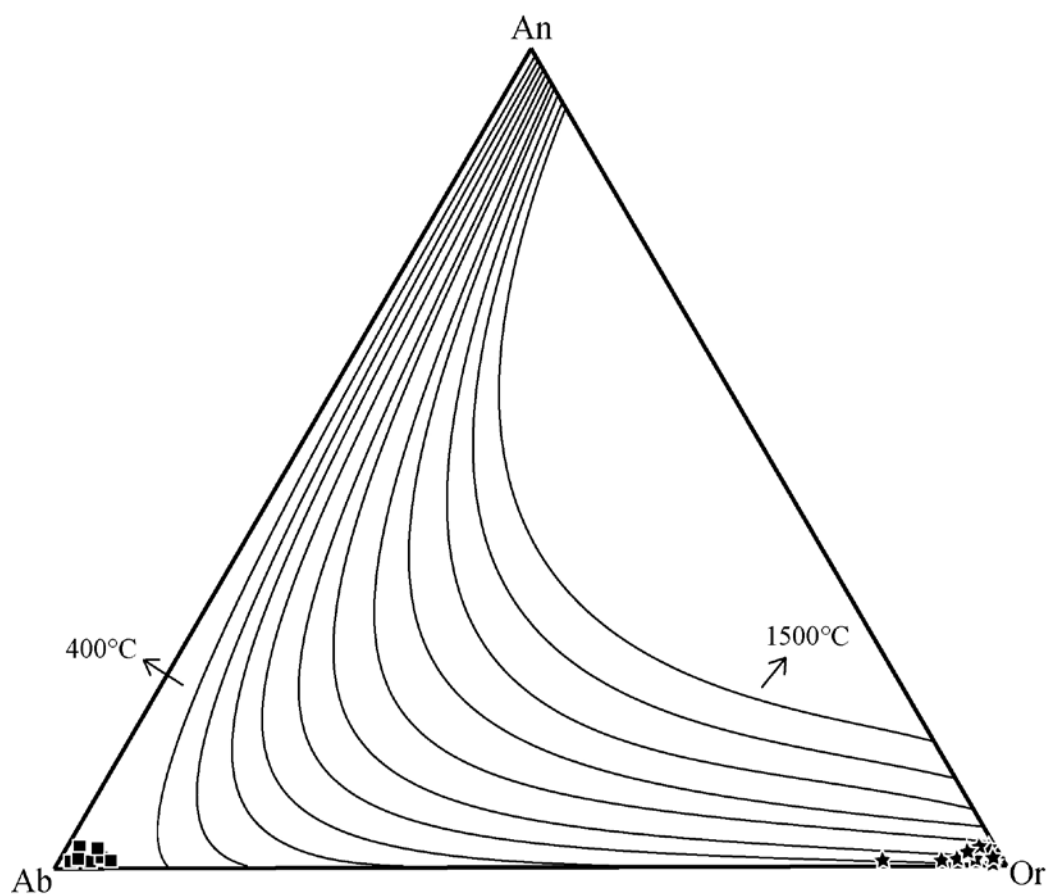


Figura 5.1: Diagrama de temperatura de equilíbrio dos feldspatos com base nos parâmetros estabelecidos por Nekvasil & Burnham (1987).

As temperaturas de equilíbrio dos feldspatos alcalinos foram estimadas com base nas curvas experimentais estabelecidas por Nekvasil & Burnham (1987), representadas na figura 5.1. A partir do diagrama observa-se que os cristais de albita encontram-se reequilibrados à baixas temperaturas.

Acredita-se que essas não sejam temperaturas representativas do estágio magmático, e sim temperaturas de equilíbrio da exsolução conforme relata Cabral (2013).

### **5.2.2. Sodalita**

Os cristais de sodalita não apresentam variações composicionais significativas entre si, conforme se observa na tabela 5.3. Incluso em cristais de sodalita são encontrados minerais como annita, torita e galena.

### **5.2.3. Micas**

A partir das análises de EDS foi possível diferenciar dois conjuntos distintos de micas. Estes conjuntos se diferenciam pelos seus conteúdos de Ti, Mg e Fe, ao passo que o valores de Si, K e Al total são bastante próximos. Em comparação, o primeiro conjunto apresenta composição mais enriquecida em Mg e Ti, correspondendo a cristais de biotita, enquanto o segundo conjunto apresenta maiores valores de Fe, correspondendo a cristais de annita.

Os cristais de biotita totalizam 13 análises, as quais estão apresentadas na tabela 5.4. No diagrama ternário Al-Mg-Fe, figura 5.2, estes dados químicos mostram o enriquecimento da biotita em magnésio, quando comparadas a outros dados disponíveis na literatura (Cabral 2008, 2013).

Tabela 5.3: Análises químicas representativas de cristais de sodalita em rochas do *Stock Itaju do Colônia*. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 24 oxigênios e 20 cátions.

Análise	Sp 115	Sp 124	Sp 115	Sp 116	Sp 117	Sp 29	Sp 69	Sp 236	Sp 273
SiO <sub>2</sub>	35,60	35,60	35,30	35,40	35,40	35,80	35,20	35,50	35,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31,30	31,40	31,30	30,90	30,70	31,00	31,00	31,10	31,50
Na <sub>2</sub> O	26,50	26,30	26,50	26,80	26,90	26,30	27,20	26,70	27,70
Cl	6,20	6,70	6,70	6,70	6,80	6,80	6,20	6,40	6,90
Total	99,60	100,00	99,80	99,80	99,80	99,90	99,60	99,70	101,90
Si	5,25	5,22	5,20	5,22	5,22	5,26	5,21	5,24	5,18
Al	5,44	5,43	5,43	5,37	5,34	5,37	5,41	5,41	5,37
Na	7,58	7,48	7,57	7,66	7,69	7,49	7,81	7,64	7,77
Cl	1,55	1,67	1,67	1,67	1,70	1,69	1,56	1,60	1,69
Total	19,82	19,80	19,87	19,93	19,96	19,80	19,99	19,88	20,02

Tabela 5.4: Análises químicas representativas de cristais de biotita em rochas do *Stock* Itaju do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 22 oxigênios e 20 cátions.

Análise	Sp10-2	Sp11-2	Sp13-2	Sp18-2	Sp04-2	Sp05-2	Sp06-2	Sp110-2	Sp111-2	Sp112-2	Sp113-2
SiO <sub>2</sub>	38,7	42	40,2	39,2	37,7	36,5	37,3	36,5	37,1	37	37,5
TiO <sub>2</sub>	2,1	1,7	1,8	1,7	1,8	2,3	2,2	2,1	2,1	2,2	2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,3	20,3	21,8	20,2	19,8	17,4	17,5	19,6	19	18,7	18,8
FeO	20,9	18,9	19,8	20,4	22,4	25,1	24,1	23	23,5	23,4	23,7
MnO	0,7			0,5							
MgO	9,1	8,5	7,1	8,6	7,5	7	7,4	7,4	7,8	7,7	7,5
K <sub>2</sub> O	10,2	8,6	9,3	9,4	10,7	11,7	11,4	10,9	10,5	10,5	10,5
Total	100	100	100	100	99,9	100	99,9	99,5	100	99,5	100
Si	5,52	5,72	5,57	5,51	5,44	5,43	5,48	5,36	5,40	5,42	5,45
Al <sup>iv</sup>	2,48	2,28	2,43	2,49	2,56	2,57	2,52	2,64	2,60	2,58	2,55
Al <sup>vi</sup>	0,60	0,98	1,13	0,86	0,81	0,48	0,52	0,75	0,66	0,64	0,67
Ti	0,23	0,17	0,19	0,18	0,20	0,26	0,24	0,23	0,23	0,24	0,22
Fe	2,49	2,15	2,30	2,40	2,70	3,12	2,96	2,82	2,86	2,87	2,88
Mn	0,08	0	0	0,06	0	0	0	0	0	0	0
Mg	1,94	1,73	1,47	1,80	1,61	1,55	1,62	1,62	1,69	1,68	1,62
K	1,86	1,49	1,64	1,69	1,97	2,22	2,14	2,04	1,95	1,96	1,95
Total	20,09	19,91	19,83	19,95	20,03	20,18	20,17	20,01	20,04	20,02	20,05
Al total	3,08	3,26	3,56	3,35	3,37	3,05	3,03	3,39	3,26	3,23	3,22
Fe	2,49	2,15	2,30	2,40	2,70	3,12	2,96	2,82	2,86	2,87	2,88
Mg	1,94	1,73	1,47	1,80	1,61	1,55	1,62	1,62	1,69	1,68	1,62
Al	3,08	3,26	3,56	3,35	3,37	3,05	3,03	3,39	3,26	3,23	3,22
Soma	7,51	7,14	7,32	7,55	7,69	7,72	7,62	7,83	7,81	7,77	7,73
Coeficiente	13,32	14,00	13,65	13,24	13,01	12,95	13,13	12,77	12,80	12,87	12,94
Fe	33,22	30,16	31,34	31,78	35,18	40,42	38,90	36,04	36,62	36,86	37,28
Mg	25,78	24,18	20,03	23,88	20,99	20,09	21,29	20,67	21,66	21,62	21,03
Al	41,00	45,66	48,63	44,35	43,83	39,49	39,81	43,29	41,72	41,52	41,68
Soma	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Os cristais de annita tem suas composições químicas expressas na tabela 5.5. Normalmente ocorrem de maneira anédrica, inclusos em cristais de albita, ortoclásio, sodalita e em cristais de magnetita. É possível encontrar cristais de annita preenchendo interstícios nos contatos entre cristais de albita e sodalita.

Quando se compara as análises das micas das rochas do SIC com as de associações de foid-sienitos da literatura (Cabral 2008, Cabral 2013) observa-se que as do presente estudo são mais ricas em Al.

#### **5.2.4. Analcima**

Cristais de analcima têm suas composições químicas apresentadas na tabela 5.6. A presença de cristais de analcima nessas rochas já havia sido relatada em estudos anteriores (Cabral 2008, Pimenta 2013). Sua ocorrência é habitual em rochas sub-saturadas em  $\text{SiO}_2$ , ocorrendo associada a outros minerais como sodalita, cancrinita e outras zeólitas (Navickas *et al.* 2003).

Tabela 5.5: Análises químicas representativas de cristais de annita em rochas do *Stock* Itaju do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 22 oxigênios e 20 cátions.

Lâmina Análise	FH3 Sp17-3	FH1 Sp48-7	FH1 Sp49-7	FH1 Sp50-7	FH2 Sp05-11	FH2 Sp56-11	FH1 Sp23-12	FH1 Sp34-12	FH1 Sp84-12	FH1 Sp133-12
SiO <sub>2</sub>	33,10	35,50	35,90	35,70	34,20	34,20	36,10	37,40	35,60	34,10
TiO <sub>2</sub>	1,50				0,60	0,70				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,30	20,80	20,80	21,30	19,30	18,70	19,30	18,30	17,20	16,20
FeO	33,80	34,50	34,80	34,60	30,30	30,90	34,60	33,20	37,00	39,60
MnO	2,60	2,70	2,70	2,60	2,10	2,00		0,80		
MgO		0,70		0,70	3,20	3,30	0,90	0,60	0,80	
Na <sub>2</sub> O	1,50						1,70			
K <sub>2</sub> O	9,10	9,90	10,00	9,90	10,40	10,20	7,40	9,80	9,30	9,30
Total	99,90	104,10	104,20	104,80	100,10	100,00	100,00	100,10	99,90	99,20
Si	5,26	5,29	5,34	5,27	5,28	5,30	5,49	5,67	5,55	5,50
Al iv	2,74	2,71	2,66	2,73	2,72	2,70	2,51	2,33	2,45	2,50
Al vi	0,68	0,95	0,99	0,98	0,79	0,71	0,95	0,94	0,72	0,58
Ti	0,18	0,00	0,00	0,00	0,07	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe	4,49	4,30	4,33	4,27	3,91	4,00	4,40	4,21	4,83	5,34
Mn	0,35	0,34	0,34	0,33	0,27	0,26	0,00	0,10	0,00	0,00
Mg	0,00	0,16	0,00	0,15	0,74	0,76	0,20	0,14	0,19	0,00
Na	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00
K	1,84	1,88	1,90	1,87	2,05	2,02	1,44	1,90	1,85	1,91
OH*	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Total	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	20,00	20,00	19,99
Total Al	3,43	3,66	3,65	3,71	3,51	3,41	3,46	3,27	3,16	3,08
Fe	4,49	4,30	4,33	4,27	3,91	4,00	4,40	4,21	4,83	5,34
Mg	0,00	0,16	0,00	0,15	0,74	0,76	0,20	0,14	0,19	0,00
Al	3,43	3,66	3,65	3,71	3,51	3,41	3,46	3,27	3,16	3,08
Soma	7,91	8,11	7,98	8,14	8,16	8,18	8,07	7,61	8,18	8,42
Coeficiente	12,64	12,33	12,53	12,29	12,25	12,22	12,39	13,13	12,23	11,87
Fe	56,72	53,03	54,28	52,53	47,94	48,94	54,57	55,28	59,04	63,43
Mg	0,00	1,92	0,00	1,89	9,02	9,32	2,53	1,78	2,28	0,00
Al	43,28	45,06	45,72	45,58	43,04	41,74	42,90	42,94	38,68	36,57
Soma	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0



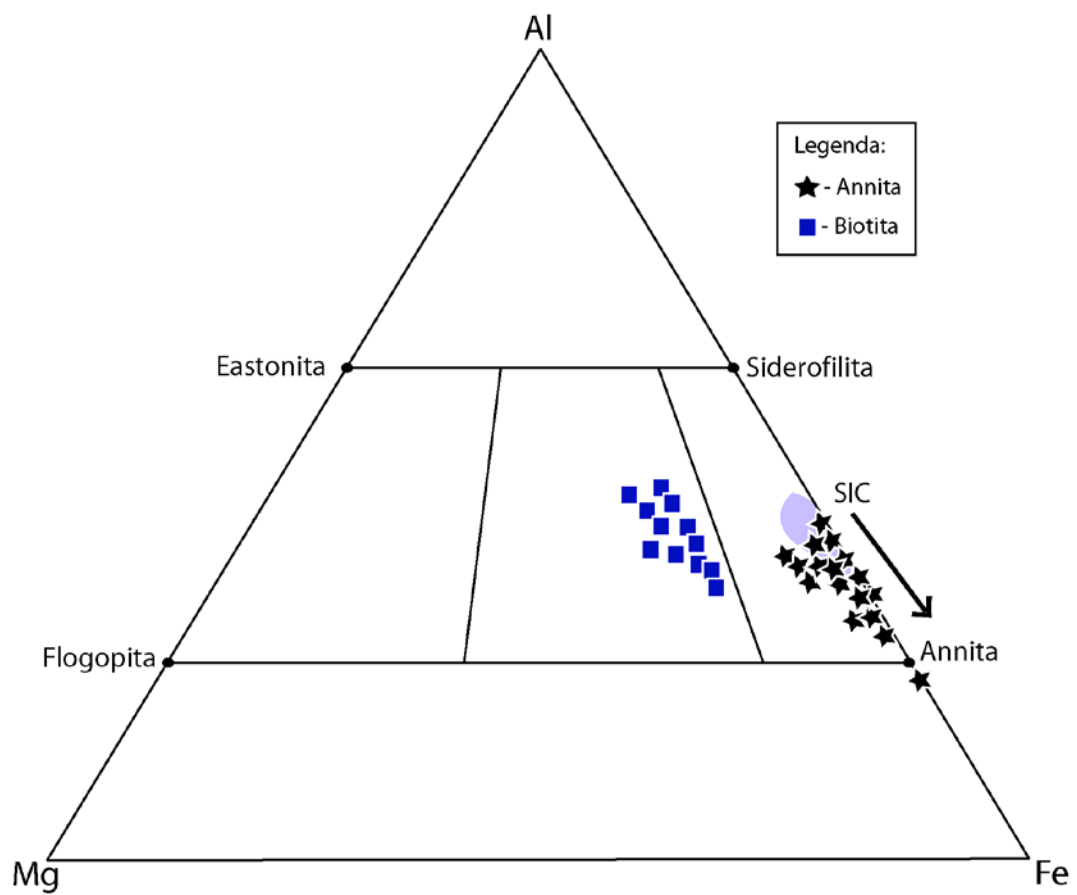


Figura 5.2: Diagrama Al-Mg-Fe aplicado a rochas do *Stock Itaju do Colônia*. A área sombreada em azul claro corresponde a amostras de Cabral (2008).

Tabela 5.6: Análises químicas representativas de cristais de analcima em rochas do *Stock* Itaju do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 96 oxigênios e 64 cátions.

Lâmina	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1
Análise	Sp111-3	Sp128-3	Sp129-3	Sp138-3	Sp139-3	Sp140-3	Sp141-3	Sp172-3	Sp177-3	Sp190-3	Sp191-3
SiO <sub>2</sub>	56,3	59,2	59	57,3	58,8	59	58,5	57,9	57,4	57,1	57,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,8	24,3	26,2	25	25,7	26,3	26,5	29,1	28,4	28,5	28,7
Na <sub>2</sub> O	15,9	14	14,8	15,9	15,5	14,7	15	13	14,2	14,5	14,1
K <sub>2</sub> O		2,5									
Total	100	100	100	98,2	100	100	100	100	100	100,1	100
Si	30,51	32,19	31,70	31,57	31,70	31,69	31,48	30,91	30,82	30,68	30,71
Al	17,76	15,58	16,59	16,24	16,33	16,65	16,81	18,31	17,98	18,05	18,16
Na	16,71	14,76	15,42	16,99	16,20	15,31	15,65	13,45	14,79	15,11	14,68
K	0	1,73	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	64,97	64,27	63,71	64,80	64,24	63,64	63,94	62,67	63,58	63,84	63,55

### 5.3. Minerais Acessórios

Os estudos por microscopia eletrônica de varredura em rochas do SIC, resultaram no diagnóstico de 18 espécimes acessórios. Desse total, doze espécimes tiveram sua identificação confirmada por meio do cálculo estrutural de sua composição química. São elas: keiviita, torita, fluorita, bastnasita, ancilita, xenotímio, galena, esfarelita, barita, magnetita, euxenita e pirocloro.

Os seis espécimes minerais restantes não foram identificados por não terem sido encontradas na literatura, minerais de composições químicas correspondentes às fases minerais diagnosticadas. Dos dezesseis minerais relatados no presente estudo, apenas a magnetita já havia sido mencionada em estudos anteriores (Cabral 2008; Cabral 2013), todos os demais representam ocorrências inéditas.

#### 5.3.1. Keiviita

Inclusa em cristais de albita, foi encontrada uma fase mineral rica em ítrio. Após a realização dos cálculos estruturais constatou-se que se tratam de cristais de keiviita-Y, mineral de ocorrência inédita até então em rochas do SIC. Os dados químicos e cálculos realizados são apresentados na tabela 5.7.

A keiviita  $(Y,Yb)_2Si_2O_7$  é um mineral pertence ao Grupo do Thortveitite, grupo com fórmula geral  $ETR_2Si_2O_7$ . Segundo Carpenter *et al.* (2011), a gênese da keiviita estaria atribuída a processos metassomáticos e sua ocorrência associada a ambientes com elevada disponibilidade de Y.

#### 5.3.2. Torita

Outro mineral acessório silicático diagnosticado neste estudo é a torita, mineral de fórmula química  $ThSiO_4$ . Seus cristais ocorrem inclusos em cristais de sodalita, apresentam dimensões inferiores a  $5\mu m$  e ocorrem desde formas euédricas até formas anédricas.

Tabela 5.7: Análises químicas representativas de cristais de keiviita em rochas do *Stock* Itaju do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 7 oxigênios e 4 cátions.

Lâmina Análise	FH1 An-1	FH1 An-2
Y2O3	40,7	40,5
SiO2	35,2	34,8
FeO	5,5	
Yb2O3	4,3	4,8
Ce2O3	3,7	3,8
Nd2O3	3,8	3,2
Dy2O3	3,8	1
Na2O	0,9	0,8
Gd2O3	2,1	2,6
Ho2O3		1,1
Er2O3		5,3
Lu2O3		2,1
Total	100	100
Y	1,29	1,32
Si	2,10	2,13
Fe	0,27	0,00
Yb	0,08	0,09
Ce	0,08	0,09
Nd	0,08	0,07
Dy	0,07	0,02
Na	0,03	0,02
Gd	0,04	0,05
Ho	0,00	0,02
Er	0,00	0,10
Lu	0,00	0,04
<b>Σ Cátions</b>	4,05	3,95

Tabela 5.8: Análises químicas representativas de cristais de torita em rochas do *Stock* Itaju do Colônia.

Lâmina	FH1	FH1	FH1	FH1	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4
Análise	Sp17-8	Sp18-8	Sp19-8	Sp22-8	Sp51-9	Sp52-9	Sp53-9	Sp54-9	Sp55-9	Sp56-9	Sp57-9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					2,5	0,7	0,4		0,5		
CaO				2,1							
K <sub>2</sub> O						0,2	0,2		0,1		
Na <sub>2</sub> O					2,8	1,7	1	0,5	0,4		0,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				0,6					0,4		
Pb						2,2	2,5	2	1,8		
SiO <sub>2</sub>	30,2	34	38,3	32,6	21,2	18,4	17,4	17,2	16,8	17,5	17,4
ThO <sub>2</sub>	65,5	62	58	63	73,4	70,3	78,5	80,2	80	82,5	82,2
F						0,7					
Total	95,7	96	96,3	98,3	99,9	94,2	100	99,9	100	100	100

### 5.3.3. Fluorita

A fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) é um importante mineral industrial, utilizado em uma ampla variedade de processos químicos, metalúrgicos e cerâmicos. Tem sua gênese associada a depósitos carbonáticos, sendo considerada um produto de atividade hidrotermal. Costuma ocorrer associada a sulfetos metálicos de chumbo, zinco e cobre, e por vezes apresenta inclusões de ítrio, európio ou samário em substituição aos átomos de cálcio em sua estrutura.

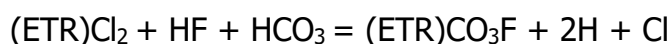
Os cristais de fluorita identificados neste estudo têm sua composição química disposta na tabela 5.9. Eles ocorrem de forma anédrica, inclusos em cristais de albita e associados à fases minerais ricas em estrôncio e ETR's. Estudos apontam que os íons fluoreto são um importante fator na precipitação de minerais com ETR, atuando como elemento essencial em reações de formação de minerais como a bastnaesita.

Devido ao seu grande raio iônico, um dos maiores da tabela periódica, íons fluoretos não são facilmente integrados ao arranjo estrutural de minerais já formados, dessa maneira sabe-se que íons fluoretos seguem livres durante todo o processo de mobilização até entrarem em contato com uma fonte de cálcio, momento no qual certamente irão depositar-se como fluorita.

### 5.3.4. Bastnaesita

Cristais de bastnasita  $[(\text{Ce}, \text{La}, \text{Y})\text{CO}_3\text{F}]$  foram encontrados inclusos em cristais de microclina. Esses cristais ocorrem associados à fases minerais ricas em estrôncio e em cério, lantânio e neodímio. As composições químicas estão dispostas na tabela 5.10.

De acordo com Williams-Jones *et al.* (2012), a deposição de fluorcarbonatos de ETR, como a bastnaesita, estaria condicionada a ambientes com alto pH, e poderia ser descrita pela reação:



Com base nesse sistema, qualquer mecanismo que conduza ao aumento do Ph ou da concentração de  $\text{HCO}_3^-$  proporcionaria condições ainda mais favoráveis à deposição de carbonatos de terras raras.

#### 5.3.5. Ancilita

A ancilita  $\text{SrCe}(\text{CO}_3)_2$  é um conhecido carbonato de cério e estrôncio, cuja ocorrência vem sendo comumente relatada em rochas alcalinas e carbonatitos.

Os cristais de ancilita foram identificados inclusos em cristais de albita. As composições obtidas encontram-se dispostas na tabela 5.11. A partir dela podemos observar variações no conteúdo dos óxidos SrO (16,8-39,3%),  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (4,4-21,6%),  $\text{La}_2\text{O}_3$  (1,2-13,8%), CaO (4,5-16,5%),  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (1,2-5,7%),  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  (1,3-1,9%). A soma do conteúdo de elementos terras raras varia entre 5,9 e 49%.

De acordo com Burtseva *et al.* (2013), a formação de carbonatos ricos em estrôncio e Elementos Terras Raras, como o caso da ancilita, tem sido interpretada como resultantes da interação de fluidos hidrotermais com a mineralogia magmática em *foi'd* sienitos.

#### 5.3.6. Xenotímio

Xenotímio ( $\text{YPO}_4$ ) é um mineral acessório comum em diferentes tipos de rochas, e em diferentes ambientes. De acordo com Chelgani *et al.* (2015), sua ocorrência mais comum seria em rochas magmáticas alcalinas, carbonáticas e em depósitos hidrotermais.

Seus cristais ocorrem inclusos em cristais de ortoclásio, em associação com cristais de torita. São cristais demasiadamente pequenos, apresentando dimensões entre 5 a 10  $\mu\text{m}$ . A composição química dos cristais de xenotímio encontra-se disposta na tabela 5.12.

Tabela 5.9: Análises químicas em cátions, representativas de cristais de fluorita em rochas do *Stock Itaju do Colônia*.

Lâmina	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH1	FH1
Análise	Sp40-10	Sp41-10	Sp86-10	Sp87-10	Sp88-10	Sp90-10	Sp91-10	Sp92-10	Sp44-11	Sp45-11
Al			0,2		0,2	0,2	0,2	0,4		
Ca	47,8	48,7	47,5	50,1	45,9	50,7	50,3	48,9	50,9	50,6
F	52,2	50,9	47,1	49,9	49,6	49,1	45,9	44	48,3	48,9
Na		0,4	0,6		0,5			0,5		
Si			0,2		0,4		0,3	0,6	0,2	0,2
Total	100	100	95,6	100	96,6	100	96,7	94,4	99,4	99,7





Tabela 5.1.1: Análises químicas representativas de cristais de ancilita em rochas do *Stock Itaju* do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 6 oxigênios e 2 cátions.

Lâmina	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1
Análise	Sp19-10	Sp58-10	Sp29-9	Sp33-9	Sp57-10	Sp59-10	Sp01-9	Sp69-10	Sp70-10	Sp28-10	Sp29-10	Sp34-9	Sp35-9	Sp97-12	Sp98-12	Sp190-12
SiO2	10,7	18,4	18			9,6		2,1	5,8					6,7	4,9	
Ce2O3	5	8,8	12,9	5	8,1	11,6	20,6	5,7	4,4	16,6	15,5	8	2,9	10,3	11,3	21,6
CaO	7,4	7	4,5	6,4	8,8	10,2	6,6	11,3	10,3	6,4	6,4	9,9	12	16,5	12,5	11,8
Na2O	14,5	8,8	14,4	11,3	14,4	7	6,3	13,5	13,2	9,8	11,3	10,4	12,3	1,3	7,3	6
Al2O3	7,7	9,4	6,8			4,7		0,7	3					2,6	2,1	
FeO	8,6			22,6	5,9			4,1	3,2			1,4	9,9			
La2O3		4,5	7,8	2,8	4,6	5,9	10,9	3,5	1,9	8,1	8,9	3,9	1,2	5,2	6	13,8
K2O	4,6	0,4				1,1										
SrO	17,4	20,2	20,5	24	25,3	27,3	27,8	29,1	29,3	32,4	32,9	33,9	35,8	39,3	32,7	24,3
Nd2O3		2,4	2,9	1,4	2	1,7	5,7	1,2	1,2	4,4	4,1	1,7		3,3	2,7	4,8
Pr2O3					1,3		1,9			1,6					1,7	1,5
ThO2	8,6	6,5			9,1	8,4		6,8	4,7					3	2,3	2
Y2O3				6,4					1,1			9,9	4,1	2,9	2	
Total	84,5	86,4	87,8	79,9	79,5	87,5	79,8	78	78,1	79,3	79,1	79,1	78,2	81,8	86,1	85,8

**Cálculo das Proporções**

Si	0,2586	0,5008	0,4541	0	0	0,2917	0	0,0628	0,1657	0	0	0	0	0	0,2056	0,1490	0
Ce	0,0442	0,0877	0,1191	0,0536	0,0914	0,1291	0,3035	0,0624	0,0460	0,2176	0,1948	0,0947	0,0306	0,1448	0,1270	0,2115	0,2924
Ca	0,1916	0,2041	0,1216	0,2007	0,2907	0,3321	0,2846	0,3621	0,3152	0,2455	0,2354	0,3430	0,3704	0,6789	0,4110	0,3257	0,4676
Na	0,6795	0,4644	0,7044	0,6411	0,8608	0,4124	0,4916	0,7829	0,7310	0,6802	0,7521	0,6521	0,6870	0,0968	0,4343	0,7545	0,4302
Al	0,2193	0,3015	0,2022	0	0	0,1683	0	0,0247	0,1010	0	0	0	0	0	0,0940	0,0752	0
Fe	0,1738	0	0	0,5529	0,1521	0	0	0,1025	0,0764	0	0	0,0379	0,2384	0	0	0	0
La	0	0,0452	0,0726	0,0302	0,0523	0,0661	0,1618	0,0386	0,0200	0,1070	0,1127	0,0465	0,0128	0,0737	0,0679	0,1211	0,1882
K	0,1418	0,0139	0	0	0	0,0426	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sr	0,2438	0,3188	0,2999	0,4072	0,4523	0,4810	0,6487	0,5047	0,4853	0,6726	0,6548	0,6357	0,5980	0,8751	0,5819	0,2961	0,5211
Nd	0	0,0233	0,0261	0,0146	0,0220	0,0184	0,0819	0,0128	0,0122	0,0563	0,0503	0,0196	0	0,0453	0,0296	0,0391	0,0634
Pr	0	0	0	0	0,0146	0	0,0279	0	0	0,0209	0	0	0	0	0	0,0188	0,0202
Th	0,0473	0,0403	0	0	0,0638	0,0581	0	0,0463	0,0305	0	0	0	0	0,0262	0,0161	0,0090	0,0168
Y	0	0	0	0,0997	0	0	0	0	0,0167	0	0	0,1704	0,0629	0,0593	0,0327	0	0
Σ Cátions	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000

Tabela 5.12: Análises químicas representativas de cristais de xenotímio em rochas do *Stock Itaju do Colônia*.

Lâmina	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1
Análise	Sp138-7	Sp139-7	Sp140-7	Sp141-7	Sp142-7	Sp143-7	Sp144-7	Sp156-12	Sp157-12	Sp158-12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>										1,7
CaO	0,6		1,2			0,7	1,5	1,4		
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,6	5,8	4,2	5,5	5,8	4,9	3,9	3,6	2,6	3,6
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3	4,2	2,8	3,6	4,6	3,6	3,3	2,4	3,1	3
K <sub>2</sub> O	0,3		0,5				0,6	0,8	0,6	1,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	32	35,4	29,5	34,9	35,4	33,3	24	35,1	35,7	33,3
SiO <sub>2</sub>	2,1	1,8	4,3	2,2	1,8	3,1	6	4	2,9	6,6
ThO	8		14,4			6,2	25			
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43,1	45,4	37,3	45,6	46,3	40,6	30,6	46,8	50,5	45,7
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,2	5,9	5,9	6,5	6	7,7	5	3,1	4,5	3
Total	100,2	98,5	100,1	98,3	99,9	97	99,9	97,2	99,9	98,5

#### **5.3.7. Galena**

A galena ( $\text{PbS}$ ) é sulfeto metálico, comumente relatado em veios hidrotermais, em associação com cristais esfarelita, fluorita e barita (Klein & Dutrow 2012).

Os cristais de galena do SIC (Tab. 5.13) ocorrem preferencialmente anédricos, apresentando contatos reentrantes com cristais de albita e feldspato potássico. Por vezes são encontrados cristais euédricos de galena inclusos em cristais de sodalita, e cristais de galena associados com uma fase mineral rica em tálio, cobre e ferro.

#### **5.3.8. Esfarelita**

A esfarelita ( $\text{Zn,FeS}$ ) é o principal mineral fonte de zinco. Os principais depósitos de esfarelita têm sua gênese relacionada à circulação de fluidos quentes em rochas carbonáticas. A composição química dos cristais de esfarelita do SIC estão dispostas na tabela 5.14. Eles ocorrem inclusos em cristais de ortoclásio, albita e sodalita. São predominantemente anédricos, e bem arredondados. Esses cristais apresentam baixos conteúdos de Fe em sua composição química.

A substituição parcial do zinco por ferro é um aspecto comum em cristais de esfarelita, desde que o conteúdo de Fe não ultrapasse 25% da estrutura mineral.

#### **5.3.9. Barita**

Barita ( $\text{BaSO}_4$ ) é o principal mineral fonte de bário. Neste estudo, os cristais de barita identificados ocorrem inclusos em cristais de albita, e em associação com cristais de magnetita. (Tab.5.15). Por possuir uma grande mobilidade decorrente da ação de soluções termais, a presença de barita é comumente associada a depósitos hidrotermais, podendo ser encontrada em assembleia com minérios de cobre, chumbo e manganês.

Tabela 5.13: Análises químicas em cátions, representativas de cristais de galena em rochas do *Stock Itaju do Colônia*.

Lâmina	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH4	FH2	FH2	FH2	FH2
Análise	Sp69-7	Sp70-7	Sp71-7	Sp72-7	Sp44-8	Sp45-8	Sp46-8	Sp13-9	Sp95-11	Sp96-11	Sp97-11	Sp104-11
F							0,6					
Fe									0,6	0,7		
Cu	1,2			1								
Pb	85,2	87,3	85,8	85,2	86,1	85,4	84,7	86	84,4	85,7	84,2	85,5
S	12,6	12,7	12,6	12,5	12,4	12,9	12,4	12,5	12,5	12,4	12,4	12,6
Total	99	100	98,4	98,7	98,5	98,3	97,7	98,5	97,5	98,8	96,6	98,1

Tabela 5.14: Análises químicas em cátions, representativas de cristais de esfalerita em rochas do *Stock Itaju do Colônia*.

Lâmina	FH1	FH1	FH1	FH1	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2
Análise	Sp07-7	Sp01-8	Sp02-8	Sp03-8	Sp02-11	Sp03-11	Sp86-11	Sp87-11	Sp91-11	Sp92-11	Sp93-11	Sp94-11
Al	0,8						0,7	0,8				
Si	1,2						0,9	1	0,3			
Cu		1,5										
Fe		2,1	1,3	1,2	1,4	1,6	1,3	1,5	4	4,1	3,4	3,4
S	30,2	30,9	31,9	32,2	40,4	40,6	28,7	28,1	30,2	30,8	31,3	31,5
Zn	65	64,5	66,8	66,6	58,3	57,8	65,7	65,6	63,6	64,1	65,3	64,3
Total	97,2	99	100	100	100,1	100	97,3	97	98,1	99	100	99,2

Tabela 5.15: Análises químicas representativas de cristais de barita em rochas do *Stock* Itaju do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 4 oxigênios e 2 cátions.

Lâmina Análise	FH4 Sp80-10	FH4 Sp81-10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,7	1,9
BaO	57,3	56,7
CaO	0,4	0,6
FeO	0,9	1,3
Na <sub>2</sub> O		1,5
SiO <sub>2</sub>	4,1	4,9
SO <sub>3</sub>	30,1	30,2
ZnO	3	1,6
Total	97,5	98,7
Al	0,076	0,083
Ba	0,857	0,825
Ca	0,016	0,024
Fe	0,029	0,040
Na	0,000	0,108
Si	0,156	0,182
S	0,862	0,841
Zn	0,085	0,044
Σ cátions	2,081	2,148

#### **5.3.10. Magnetita**

Os estudos por EDS constataram a presença de cristais de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), sendo totalizadas 35 análises, as quais são apresentadas na tabela 5.16. As análises químicas constatam que as variações composicionais entre cristais são relativamente pequenas.

Os cristais ocorrem predominantemente inclusos em cristais de albita, sendo, por vezes, encontradas inclusões de annita e pirocloro em cristais de magnetita.

Em alguns dos cristais de magnetita são diagnosticados conteúdos de Cr e Ni. A presença desses elementos evidencia a precocidade desses cristais, uma vez que Cr e Ni são elementos fortemente compatíveis sendo agregados na estrutura dos primeiros minerais cristalizados.

#### **5.3.11. Euxenita**

Cristais de euxenita  $(\text{Y,Ca,Ce})(\text{Nb,Ta,Ti})_2\text{O}_6$  tem suas composições químicas apresentadas na tabela 5.17. Eles ocorrem inclusos em cristais de ortoclásio e em cristais de albita. São cristais arredondados, com dimensões aproximadas de  $2,5\mu\text{m}$ .

#### **5.3.12. Pirocloro**

Os cristais de pirocloro ocorrem de maneira bastante diversificada sendo encontradas como cristais isolados e também sob a forma de pequenos agregados (Fig. 5.3a). Por vezes, os cristais ocorrem nas bordas de contato entre cristais de microclina e sodalita formando filetes conforme podemos observar na figura 5.3b.

Sua presença é predominantemente observada em cristais de albita, contudo também são encontrados cristais inclusos em magnetita, sodalita e ortoclásio. Em alguns dos cristais de albita observa-se que os cristais de pirocloro ocorrem envoltos por um material rico em ferro (Fig. 5.3c).

Tabela 5.16: Análises químicas representativas dos cristais de magnetita em rochas do *Stock* Itaju do Colônia. O cálculo da fórmula estrutural foi realizado com base em 4 oxigênios e 3 cátions.

Lâmina Análise	FH1 Sp03-7	FH1 Sp15-7	FH1 Sp80-7	FH1 Sp83-7	FH1 Sp84-7	FH1 Sp07-8	FH1 Sp08-8	FH4 Sp36-9	FH4 Sp42-10	FH4 Sp79-10	FH4 Sp82-10	FH4 Sp83-10	FH4 Sp97-10	FH2 Sp01-11	FH2 Sp62-11	FH2 Sp134-11
TiO <sub>2</sub>						1,3	0,8									
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9					0,5	1,6			3,6	7,2	7,5	5,9			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			17,7	17,3	17,9											
FeO	96,1	100	72,9	74,6	74	95,8	94	95,6	100	91,5	84	82,1	82,2	100	100	94,5
MnO			1,2													
NiO			8,2	8,1	8,1											
Total	97	100	100	100	100	97,6	96,4	95,6	100	95,1	91,2	89,6	88,1	100	100	94,5
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,09	0,00	0,00	0,20	0,41	0,43	0,35	0,00	0,00	0,00
Cr	0,00	0,00	0,62	0,61	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe++	3,92	4,00	2,72	2,79	2,76	3,86	3,80	4,00	4,00	3,69	3,39	3,35	3,47	4,00	4,00	4,00
Mn	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ni	0,00	0,00	0,29	0,29	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	3,97	4,00	3,69	3,69	3,68	3,94	3,93	4,00	4,00	3,90	3,80	3,78	3,82	4,00	4,00	4,00
% Hercynita	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08	3,49	0,00	0,00	7,88	16,17	17,11	13,78	0,00	0,00	0,00
% Magnetita	98,05	100,00	74,58	75,16	74,29	95,33	94,29	100,00	100,00	92,12	83,83	82,89	86,22	100,00	100,00	100,00
% Cromita	0,00	0,00	25,42	24,84	25,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% Ulvöspinel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,59	2,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Tabela 5.17: Análises químicas representativas de cristais de euxenita em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina	FH1	FH1	FH1	FH1	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2
Análise	Sp74-8	Sp83-8	Sp84-8	Sp85-8	Sp16-11	Sp17-11	Sp19-11	Sp20-11	Sp21-11	Sp23-11	Sp24-11
CaO	0,9	0,9	1	0,7							0,4
CoO											1,6
F	0,9	1,3	1,1	1,1							
Er2O3	2,9	2,6	2,3			2,8	3,6		2,3		
Dy2O3	1,8	3,1	2,2	3,3	3,2	2,3	2,8		2,5	3	2,1
FeO					1,4				0,9		0,6
Gd2O3											2,4
Na2O	1,7	1,6	2,2	1,7		0,7					
Nb2O5	50,6	49,7	48,9	51	56,7	52,3	53,7	57,7	53,8	55,1	53,2
Nd2O3						1,3					
SiO2	4,3	4,2	7,3	4,5		3,9					
ThO2							2,8	2,5	2,9	3,3	2,5
Y2O3	31,7	31,4	29,5	31,8	32,3	33,2	32,6	35,9	32,8	31,7	33,4
Yb2O3	5,1	4,2	4,4	4,9	6,4	3,5	4,4	3,9	4,8	6,9	3,8
Total	99,9	99	98,9	99	100	100	99,9	100	100	100	100

Embora a maioria de seus cristais não apresentem variações composicionais significativas, são encontrados minerais com uma leve variação composicional interna (Fig. 5.3d).

A partir das imagens BSE é possível observar que as bordas possuem uma tonalidade mais clara em decorrência da variação composicional existente entre a borda e o centro do cristal. Na borda são detectados conteúdos de titânio, neodímio e tungstênio, elementos não encontrados no centro.

Os cristais de pirocloro foram classificados e nomeados de acordo com os parâmetros adotados pela IMA (*International Mineralogical Association*), que têm por base as diretrizes propostas por Atencio *et al.* (2010) para os minerais do Supergrupo do Pirocloro.

A fórmula geral deste supergrupo é  $A_{2-m} B_2 X_{6-w} Y_{1-n}$ . O sítio A, de coordenação 8, pode ser ocupado por Na, Ca, Mn, Sr, Ba,  $Fe^{+2}$ ,  $Pb^{+2}$ ,  $Sn^{+2}$ ,  $Sb^{+3}$ ,  $Bi^{+3}$ , Y, Ce (e outros Elementos Terras Raras), além de Sc, U, Th ou  $H_2O$ . O sítio B, sítio de coordenação 6, é usualmente ocupado por Ta, Nb, Ti,  $Sb^{+5}$ , W,  $V^{+5}$ ,  $Sn^{+4}$ , Zr, Hf,  $Fe^{+3}$ , Mg, Al e Si. O sítio X é ocupado essencialmente por oxigênio e, de forma subordinada, por OH e F. O sítio Y pode ser vago ou ocupado total ou parcialmente por  $H_2O$ , OH-, F, K, Cs e Rb. Os símbolos m, w e n na fórmula correspondem a parâmetros indicando a ocupação incompleta dos sítios A, X e Y respectivamente.

Os cálculos da fórmula estrutural (Tabela 5.18) basearam-se em B=2 e a partir destes resultados obteve-se os valores catiônicos de Nb, Ti e Ta utilizados para classificar os cristais analisados.

A ocupação da posição B é utilizada para estabelecer as subdivisões do Supergrupo do Pirocloro (Atencio *et al.* 2010). Nota-se que todos os cristais analisados se posicionam unicamente no campo do Sub-Grupo do Pirocloro e que a maioria de suas composições têm mais que 90% de Nb (Figura 5.4).

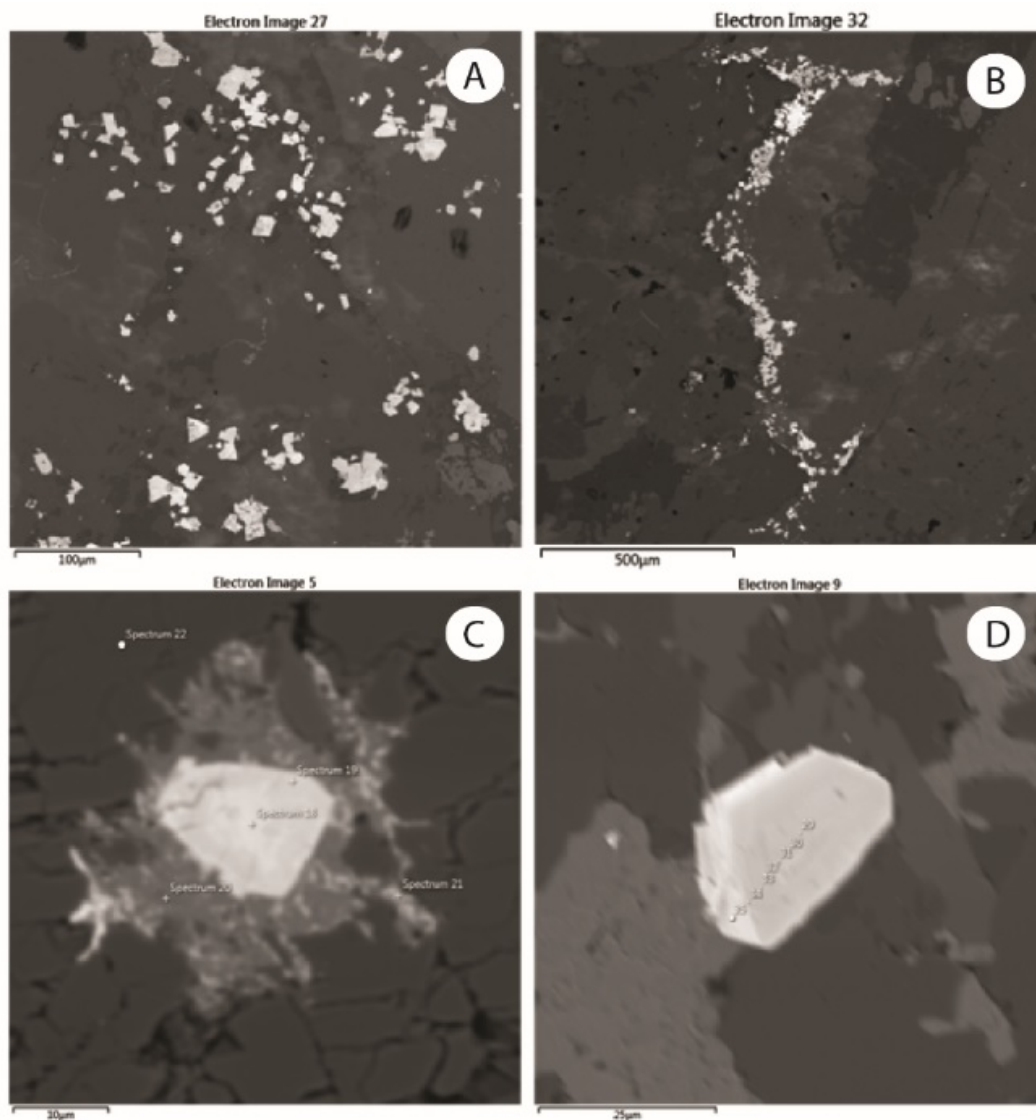


Figura 5.3: Modos de ocorrência dos cristais de pirocloro. (A) Cristais de pirocloro soltos ou sob a forma de pequenos agregados. (B) Cristais de pirocloro formando filetes que preenchem os interstícios entre cristais de sodalita e ortoclásio. (C) Cristal de pirocloro coroador por material rico em Fe. (D) Leve zoneamento composicional em cristal de pirocloro.



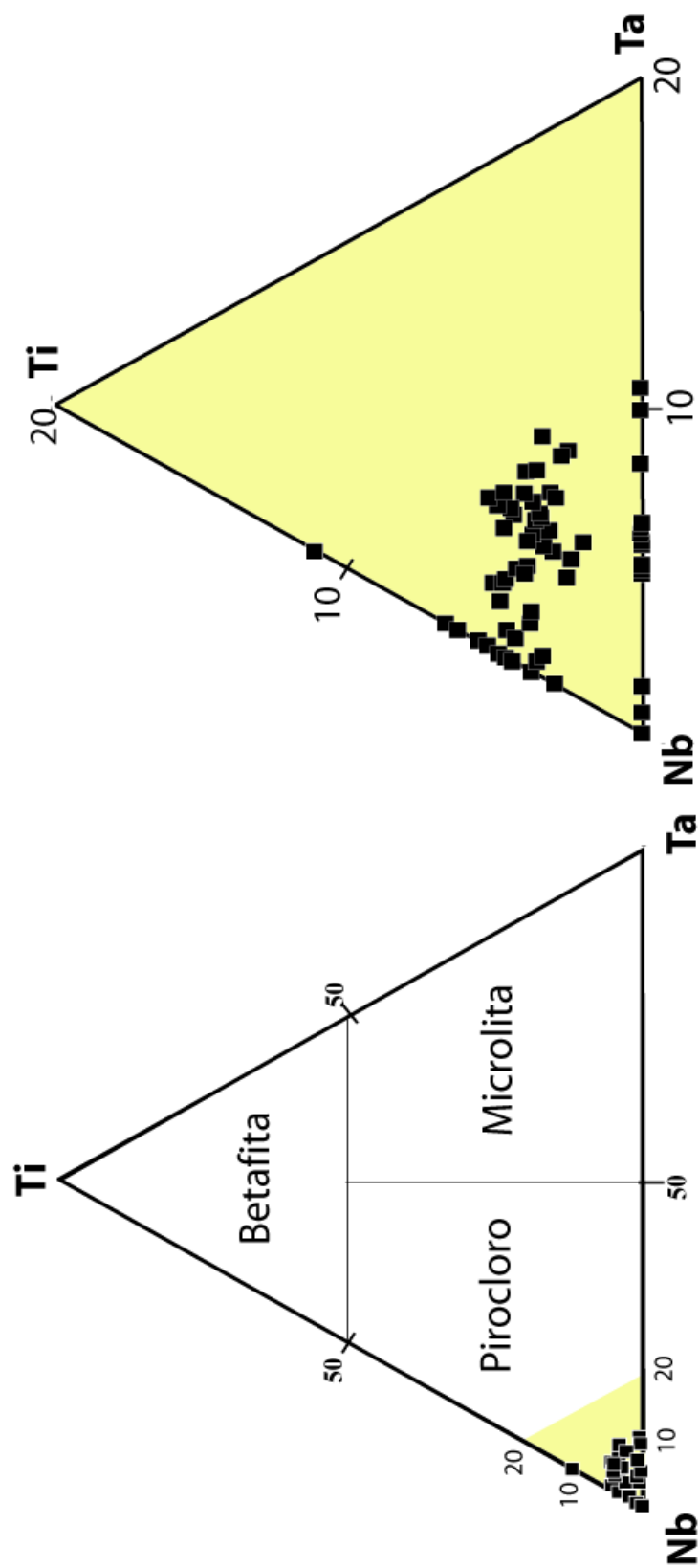


Figura 5.4: Diagrama ternário catiônico Ti-Nb-Ta para a classificação dos minerais do Supergrupo do Pirocloro, segundo Atencio *et al.* (2010). Esse diagrama classifica os minerais desse supergrupo em: Pirocloro  $[(\text{Na,Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH,F})]$ , Microlita  $[(\text{Na,Ca})_2\text{Ta}_2\text{O}_6(\text{O,OH,F})]$  e Betafita  $[(\text{Ca,U})_2(\text{Ti,Nb,Ta})_2\text{O}_6(\text{OH})]$ . O diagrama à direita corresponde a ampliação da área amarela do diagrama à esquerda.

Foram identificados dois tipos de cristais de pirocloro com aspectos bastante distintos entre si (Figura 5.5). O primeiro conjunto possui uma aparência bastante similar com a maioria dos cristais encontrados, homogêneos, com forma euédrica a subédrica, e tonalidade clara. O segundo grupo apresenta tonalidade mais escura, forma predominantemente subédrica e um grande número de fraturas em seus cristais.

Composicionalmente, esses grupos distinguem-se pelo conteúdo de lantânio e cério. O primeiro grupo, embora possua um conteúdo menor de nióbio, apresenta valores mais elevados de cálcio, além de conter pequenas quantidades de flúor e estrôncio, que raramente são encontradas no segundo grupo. Em contrapartida, os cristais fraturados que formam o segundo conjunto apresentam significativas quantidades de cério, lantânio, potássio e titânio, além de apresentarem maiores conteúdos de nióbio.

As amostras de ambos os grupos foram lançadas no diagrama ternário Vacância-Ca-Na, a fim comparar os dados composicionais dos cristais de pirocloro do SIC com a tendência de evolução dos pirocloro reportada na literatura (Nasraou & Bilal 2000). Percebeu-se que os cristais estudados apresentam composições desde o domínio primário (magmático) até o hidrotermal (Fig. 5.6).

Esse comportamento mineraloquímico dos cristais de pirocloro do SIC revelam que eles iniciaram a cristalização no final da formação da sodalita, que é a última fase magmática a se cristalizar nesse stock (Cabral 2013), até as condições hidrotermais responsáveis pela formação de zeólitas (Pimenta *et al.* 2014).

Na PASEBA a cristalização de minerais exóticos e enriquecidos em elementos incompatíveis é frequentemente associada a fluidos hidrotermais. Temos como exemplo as já relatadas ocorrências de thomsonita, zeólita de Sr, em rochas do SIC (Pimenta *et al.* 2014) e ancilita em rochas do Complexo Floresta Azul - CAFA (Santos *et al.* 2014).

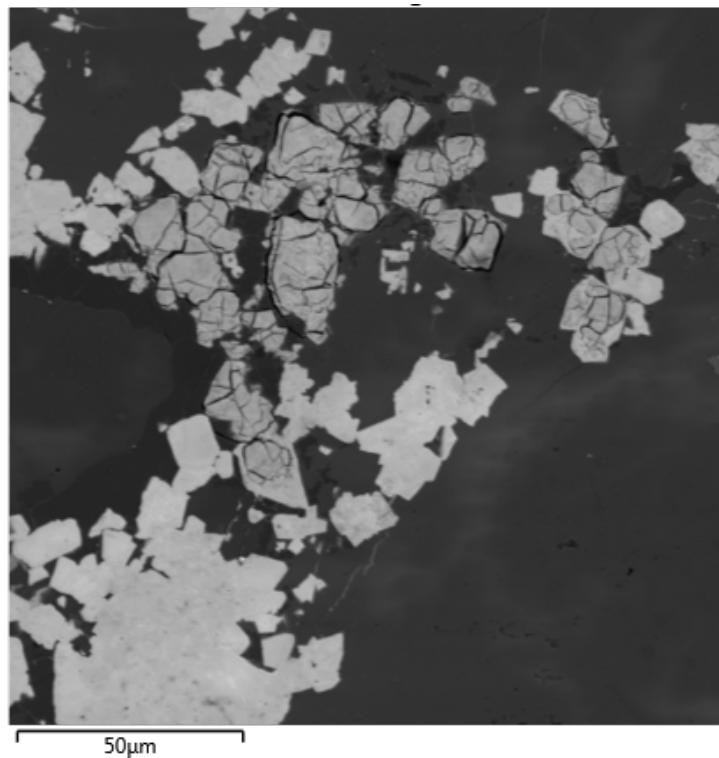


Figura 5.5: Variação da textura dos cristais de pirocloro em rocha do *Stock Itaju do Colônia*.

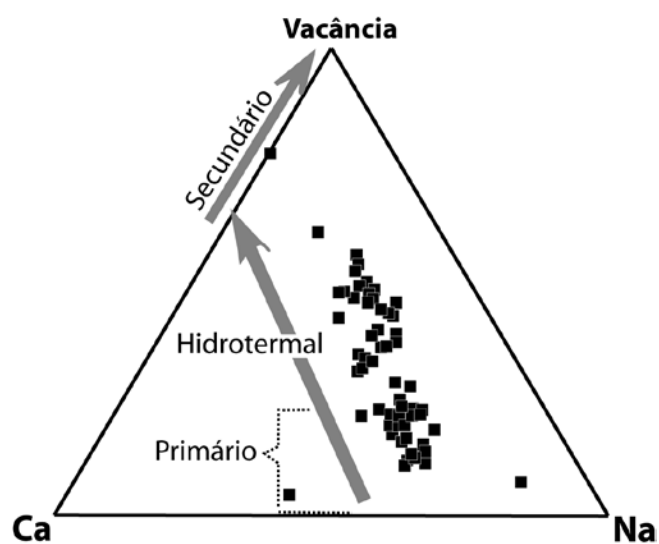


Figura 5.6: Diagrama ternário catiônico Vacância – Ca – Na para classificação do estágio de cristalização dos cristais de pirocloro, segundo Nasraou & Bilal (2000).

Tabela 5.19: Dados químicos representativos dos dois grupos que caracterizam a tendência evolucionária dos cristais de pirocloro. O grupo 1 corresponde aos cristais de domínio magmático e o grupo 2 correspondente aos cristais de domínio hidrotermal.

Lâmina Análise	FH3 Sp 40	FH3 Sp 01	FH3 Sp 08	FH3 Sp 11	FH3 Sp 13	FH3 Sp 21	FH3 Sp 30	FH3 Sp 34	FH3 Sp 37	FH3 Sp 42	FH3 Sp 38	GRUPO 1											GRUPO 2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,5	8,9	7,6	9,6	7,6	9,8	9,7	6,5	8,9	8,6	7		2,4	3,9	2	4,6	4	0,4	0,6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											



#### 5.4. Minerais Desconhecidos

Nesse estudo contatou-se a presença de fases minerais com significativas quantidades de ETR e metais de transição em sua composição química. Embora não tenham sido encontrados correspondentes minerais que nos permitisse classificar essas fases minerais, considerou-se pertinente o relato e a descrição destas.

Foram identificadas dez fases minerais distintas. São elas: uma fase mineral rica em ETR, um silicato de estrôncio, um óxido de estrôncio, um carbonato de estrôncio, uma fase mineral rica em ferro e manganês, uma fase mineral rica em cobre e tálio, um silicato de itérbio e outro de itérbio, uma fase mineral rica em tório e uma fase mineral rica em nióbio e tungstênio. As análises químicas referentes a essas fases estão em anexo.

Foram encontrados cristais com um grande conteúdo de elementos terras-raras como cério, lantânio, neodímio e praseodímio. Esses cristais ocorrem inclusos em cristais de ortoclásio e em cristais de sodalita, são bem arredondados e apresentam dimensões de aproximadamente 1µm.

O silicato de estrôncio apresenta consideráveis conteúdos de lantânio, cério, tório e neodímio. Esses cristais possuem dimensões menores que 5µm, são bem arredondados e ocorrem inclusos em cristais de albita e em cristais de sodalita. Esta fase comumente ocorre sendo coroados por um outro mineral de estrôncio, possivelmente um carbonato. Associados a ele são encontrados cristais de torita e fluorita, sendo por vezes encontrados cristais de uma fase mineral rica em ferro e manganês associados.

Alguns desses cristais chegam a apresentar teor de manganês superior a setenta por cento. Eles ocorrem com formato alongado, inclusos em cristais de ortoclásio.

Também inclusas em cristais de ortoclásio, foram identificadas outras fases minerais compostas por: cobre e tálio, um silicato de itérbio e um de ítrio, uma fase mineral rica em tório e uma fase rica em nióbio e tungstênio.

Capítulo 6

# Caracterização Geoquímica

Introdução

Classificação Geoquímica

Composição Normativa

Diagramas de Variação

Elementos Terras-Raras

## 6.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os dados geoquímicos obtidos para as rochas *Stock Itaju* do Colônia. Ao todo foram realizadas 5 análises químicas. Os dados obtidos foram comparados com outros dados disponíveis na literatura (Cabral 2008) e estão dispostos na tabela 6.1.

As análises geoquímicas foram realizadas nos laboratórios da Acme Labs® - *Acme Analytical Laboratories*. Para cada amostra foram dosados os elementos maiores SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, elementos menores F, S, Ba, Rb, Sr, Cs, Ga, Ta, Nb, Hf, Zr, Y, Th, U, Cr, Ni, Co, Sc, V, Cu, Pb, Sn, W e Mo e elementos terras raras La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Yb, Lu, Pr, Tb e Tm. As amostras foram abertas a partir da fusão por LiBO<sub>2</sub> e ácido nítrico, os elementos maiores foram dosados por ICP-ES, enquanto os ETR e elementos traços foram dosados por ICP-MS.

## 6.2. Classificação Geoquímica

A classificação geoquímica foi realizada com base nos principais diagramas presentes na literatura e indicados para o tipo de rocha encontrada no SIC.

### 6.2.1. Diagrama Total Álcalis *versus* Sílica – Currie (1976)

Das cinco análises de rochas do SIC lançadas no diagrama de Currie (1976), três amostras alocaram-se no campo dos sienito miasquíticos, uma no campo dos sienitos agapaíticos, enquanto a quinta e última amostra posiciona-se no limite entre os dois campos anteriores.

A disposição das amostras no diagrama foi comparada com os dados apresentados por Cabral (2013), e ambos apresentam padrão de distribuição bastante similar conforme podemos observar na figura 6.1.

Tabela 6.1: Dados de elementos maiores e traços em rochas do *Stock* Itaju do Colônia.

	FH-1	FH-2	FH-3	FH-4	528-C
SiO <sub>2</sub>	55.88	53.74	59.94	57.85	43.43
TiO <sub>2</sub>		0.03	0.02		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.91	22.69	19.92	22.49	29.7
FeO					
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.46	3.17	2.61	0.42	0.35
MnO	0.02	0.12	0.11		0.03
MgO		0.18	0.04		0.01
CaO	0.03	0.07	0.41	0.11	0.23
Na <sub>2</sub> O	11.21	9.77	10.31	11.31	21.21
K <sub>2</sub> O	6.62	6.93	4.38	5.56	1.53
Ba	<b>46</b>	28	29	28	34
Rb	243.6	<b>352.9</b>	212.9	226.8	57
Sr	28.5	9.3	8.1	<b>89.5</b>	80.1
Zr	<b>1527.6</b>	31.3	332.7	360.7	12.9
Nb	<b>471.6</b>	45	99	10.4	55.6
Ni	0.3	1.9	0.8	0.6	0.3
Co	<0.2	0.4	0.3	<0.2	<0.2
Zn	4	<b>75</b>	30	4	8
La	<b>22.3</b>	11.2	3.7	3.6	3.9
Ce	<b>44.9</b>	23.1	8.2	7.1	7.4
Pr	3.52	1.97	0.67	0.59	0.59
Nd	8.9	6.8	2.3	1.8	2
Sm	1.27	1.07	0.31	0.31	0.27
Eu	0.12	0.1	0.03	<0.02	<0.02
Gd	1.21	0.97	0.26	0.34	0.17
Tb	0.25	0.17	0.05	0.06	0.03
Dy	2.12	1.2	0.44	0.55	0.22
Ho	0.7	0.31	0.1	0.16	0.05
Er	2.86	1.03	0.4	0.5	0.13
Tm	0.55	0.15	0.09	0.08	0.02
Yb	3.99	1.07	0.79	0.69	0.13
Lu	0.66	0.18	0.11	0.1	0.02
Y	<b>20.9</b>	10.3	3.2	4.5	1.6
Cs	1.6	3.3	0.9	1.5	0.2
Ta	79	2.3	12.6	2.5	9.3
Hf	<b>31.4</b>	1	7.5	6.7	0.5

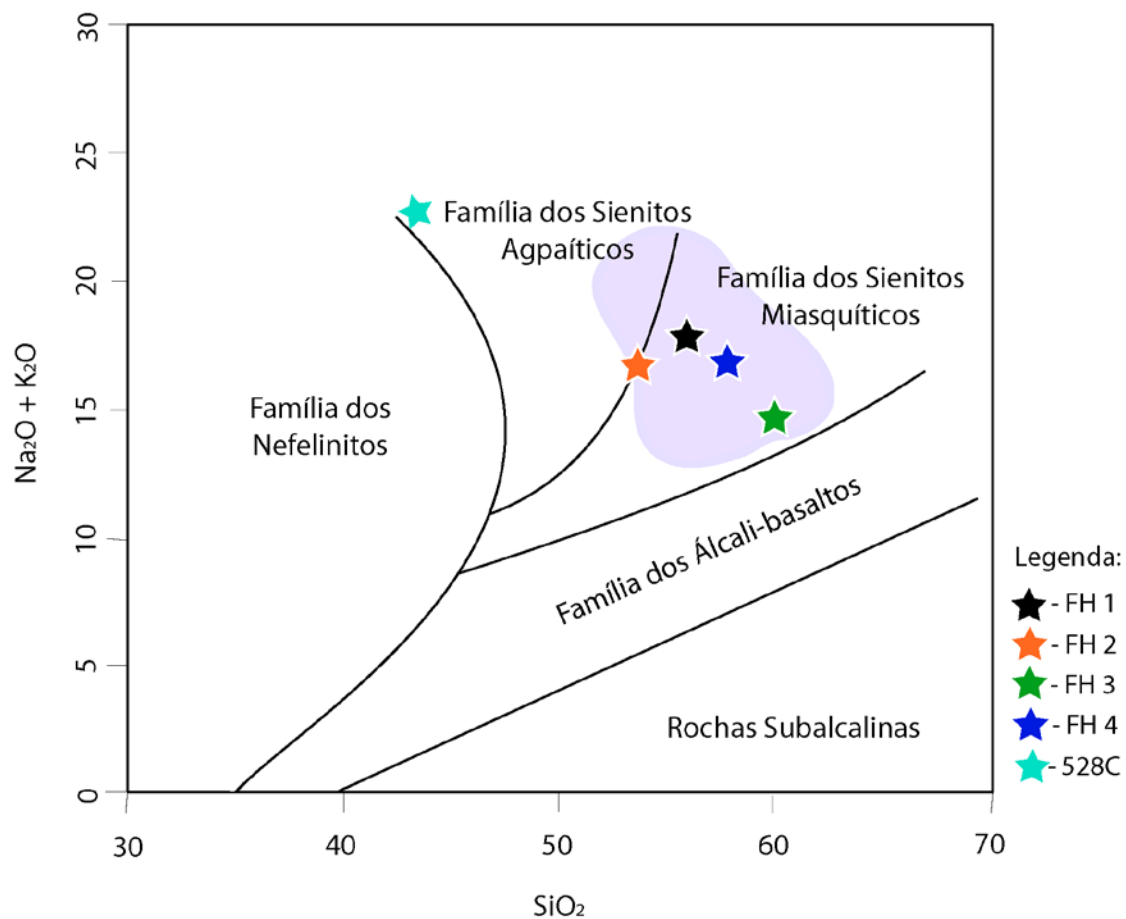


Figura 6.1: Diagrama de classificação de rochas alcalinas segundo Currie (1976). A área em azul demarca as análises realizadas por Cabral (2013).

### 6.3. Relação $K_2O$ e $Na_2O$

O estudo da relação entre os álcalis tem por finalidade determinar o carácter sódico ou potássico das rochas analisadas. Nesta etapa os dados foram trabalhados segundo os parâmetros de Le Maitre *et al.* (1989), sendo estabelecido que os valores de  $Na_2O$  devem ser primeiramente subtraídos por 2 e só então comparados com os conteúdos de  $K_2O$ .

Como resultado, as rochas são classificadas com sódicas nos casos em que  $(Na_2O - 2) > K_2O$  e potássicas se  $(Na_2O - 2) < K_2O$ . Segundo esta classificação 4 amostras classificam-se como rochas potássicas, e apenas 1 amostra como sódica, conforme observar-se na figura 6.2.

### 6.4. Composição Normativa

Os cálculos da composição normativa estão dispostos na tabela 6.2. Todas as amostras possuem conteúdos normativos de ortoclásio, nefelina, diopsídio, acmita e  $Na_2SiO_3$ . Conforme o esperado, as amostras não apresentam conteúdos de quartzo normativo.

Dentre as amostras de rochas, nota-se que a amostra 528-C possui comportamento bastante diferenciado em comparação com às demais. Essa é a única amostra que não apresenta valores normativos para olivina e plagioclásio, sendo também a única a apresentar conteúdos normativos de leucita (0,41%) e wollastonita (0,05%). Sua norma é dentre todas a que apresenta os maiores valores de  $Na_2SiO_3$  (8,11%) e nefelina (78,14%); e os menores valores de ortoclásio (8,51%) e acmita (0,32%).

Nas quatro demais amostras o plagioclásio normativo é albita ( $NaAlSi_3O_8$ ). O ortoclásio ( $KAlSi_3O_8$ ) varia entre 25,88% e 40,95%. A nefelina ocorre com valores compreendidos entre 16,4% e 34,52%. O diopsídio varia de 0,13% a 1,8%; a olivina compreende de 0,16% e 1,79%, a acmita e  $Na_2SiO_3$  apresentam valores entre 0,38% a 2,75%, e de 0,33% a 3,14%, respectivamente. O zircão está presente em três das cinco amostras, a FH1 (0,31%), a FH3 (0,06%) e FH4 (0,07%). A ilmenita ocorre em apenas duas amostras, FH2 (0,06%) e FH3 (0,04%).

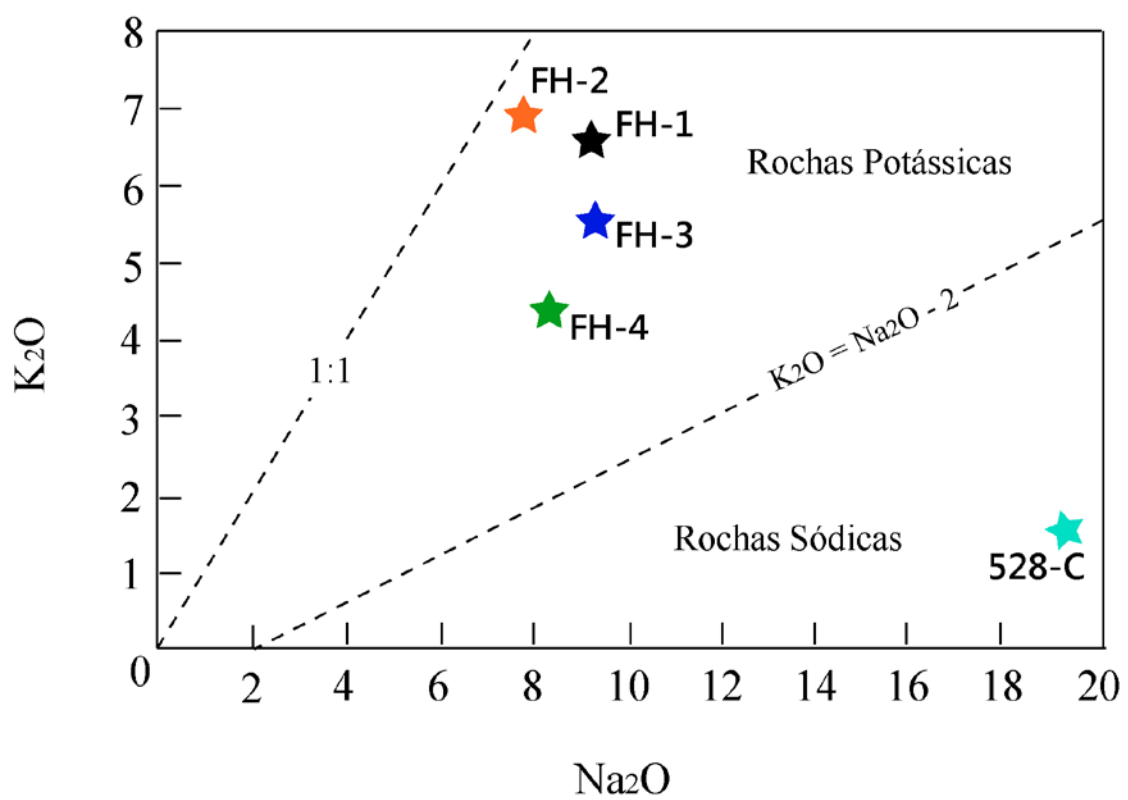


Figura 6.2: Diagrama K<sub>2</sub>O *versus* Na<sub>2</sub>O, para determinação do caráter sódico ou potássico de rochas do *Stock Itaju* do Colônia.

Tabela 6.2: Tabela de Composição Normativa

	FH-1	FH-2	FH-3	FH-4	528-C
SiO <sub>2</sub>	55.88	53.74	59.94	57.85	43.43
TiO <sub>2</sub>		0.03	0.02		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.91	22.69	19.92	22.49	29.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.46	3.17	2.61	0.42	0.35
MnO	0.02	0.12	0.11		0.03
MgO		0.18	0.04		0.01
CaO	0.03	0.07	0.41	0.11	0.23
Na <sub>2</sub> O	11.21	9.77	10.31	11.31	21.21
K <sub>2</sub> O	6.62	6.93	4.38	5.56	1.53
Total	97.13	96.7	97.74	97.74	96.49

Minerais normativos CIPW - % em peso

Plagioclásio	21.43	14.4	47.8	33.63	0
Ortoclásio	39.19	40.95	25.88	32.86	8.51
Nefelina	32.23	34.52	16.4	27.68	78.14
Leucita	0	0	0	0	0.41
Kalsilita	0	0	0	0	0
Coríndon	0	0	0	0	0
Diopsídio	0.13	0.3	1.8	0.51	0.92
Wollastonita	0	0	0	0	0.05
Olivina	0.39	3.16	1.79	0.16	0
Larnita	0	0	0	0	0
Acmita	0.41	2.75	2.26	0.38	0.32
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	3.14	0.33	1.54	2.46	8.11
Ilmenita	0	0.06	0.04	0	0
Magnetita	0	0	0	0	0
Apatita	0	0	0	0	0
Zircão	0.31	0	0.06	0.07	0
Total	97.23	96.47	97.57	97.75	96.46



## 6.5. Diagramas de Variação

Os diagramas de variação são os registros das alterações químicas que ocorrem durante a diferenciação do magma. Nesse estudo, os diagramas de variação utilizam o óxido  $\text{SiO}_2$  como indicador de fracionamento.

### 6.5.1. Elementos Maiores e Menores

As variações mais pronunciadas (Fig.6.3) são observadas nos conteúdos de Na, Al e K, exatamente como já relatado por Cabral (2013), que correlaciona os elevados conteúdos desses elementos à presença de feldspatos e feldspatóides nas rochas estudadas.

Os três elementos possuem padrões evolutivos semelhantes, apresentando boas correlações negativas com o  $\text{SiO}_2$ , ou seja, seus valores diminuem a medida que o conteúdo de sílica aumenta.

O decréscimo destes elementos está diretamente relacionado a cristalização de minerais que contêm esses elementos. A cristalização é responsável pelo “consumo” desses elementos, incorporando-os em sua estrutura atômica. No entanto, o aumento nos conteúdos de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  presente nas vênulas indica que esses elementos foram incorporados durante a cristalização de minerais mais tardios.

Nota-se que os conteúdos de Ti, Mg e Ca são muito baixos, com valores menores que 1. Observa-se que esses elementos não apresentam *trend* evolutiva alinhado, descrevendo assim uma trajetória particular.

### 6.5.2. Elementos Traço

Os padrões evolutivos de elementos traços não são tão evidentes quando comparados aos padrões encontrados para elementos maiores e menores, contudo, os padrões diagnosticados são bastante similares entre si, conforme podemos observar na distribuição de pontos de La, Ce, Y e Zr (Figura 6.4).

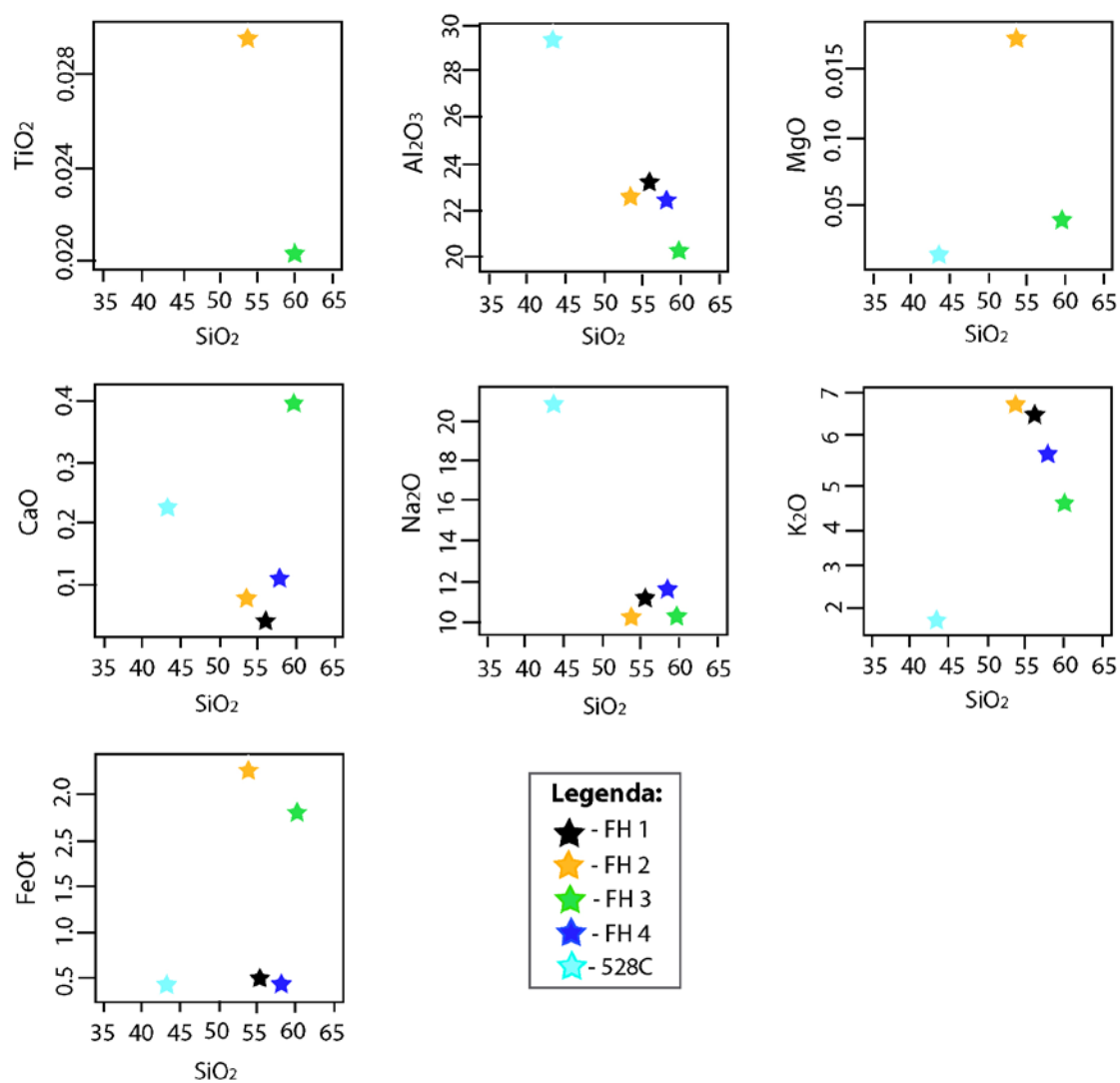


Figura 6.3: Diagrama de variação aplicada a elementos maiores em rochas do *Stock Itaju* do Colônia.

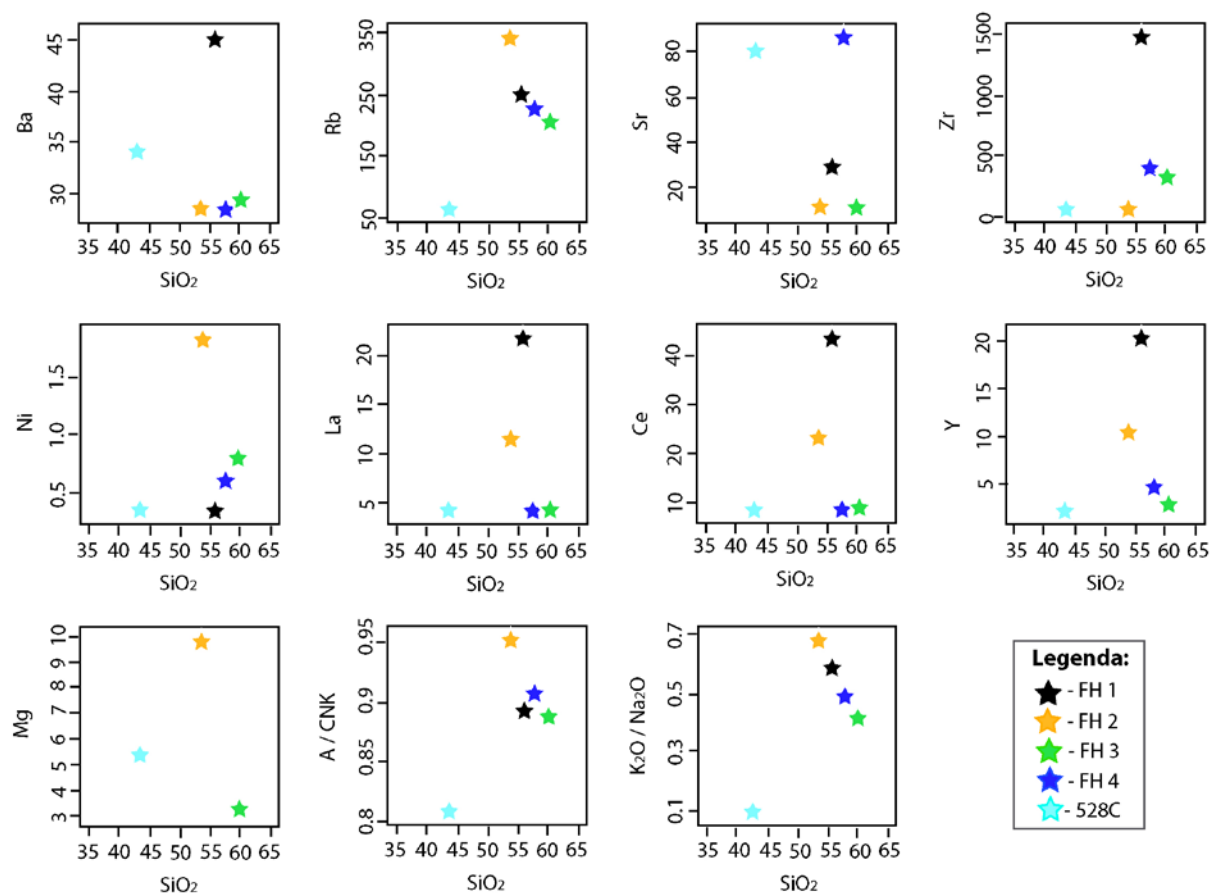


Figura 6.4: Diagramas de variação aplicados a elementos traços em rochas do *Stock Itaju do Colônia*.

## **6.6. Diagramas de Saturação em Alumínio**

O índice de saturação em alumina foi determinado com base nas proporções moleculares estabelecidas por Maniar & Piccoli (1989) e representadas segundo os parâmetros gráficos de Shand (1943). Ao lançar os dados no diagrama (Fig. 6.5) observa-se que amostras se alocam no campo das suítes peraluminosas e apresentam padrão de distribuição semelhante ao apresentado por Cabral (2013).

Rochas metaluminosas costumam apresentar baixos níveis de Zr isso porque líquidos magmáticos metaluminosos comumente cristalizam zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ ).

No entanto, em líquidos magmáticos peralcalinos, os átomos de Zr formam complexos moleculares com sódio e ferro tornando-se assim mais estável no líquido magmático do que na estrutura do zircão. Dessa maneira, o Zr atua como elemento incompatível o que resulta em sua alta concentração no líquido magmático.

## **6.7. Espectro de Elementos Terras Raras**

Uma das ferramentas mais importantes no estudo de rochas alcalinas é a interpretação da geoquímica de elementos terras raras (ETR). No presente estudo, as concentrações de ETR foram normalizadas pelo condrito, segundo as recomendações de Boynton (1984). As razões normalizadas são apresentadas na figura 6.6.

A partir dos gráficos podemos observar uma significativa anomalia negativa de Eu. Esse comportamento é atribuído ao processo de fracionamento dos feldspatos.

A anomalia de Eu está diretamente relacionada ao número de oxidação dos elementos terras raras, isto por que a grande maioria do ETR possui valência +3, sendo o elemento Eu é um dos poucos elementos terras que possuem valência +2. Por ser divalente, o Európio ( $\text{Eu}^{2+}$ ) é compatível com a estrutura do plagioclásio e k-feldspato.

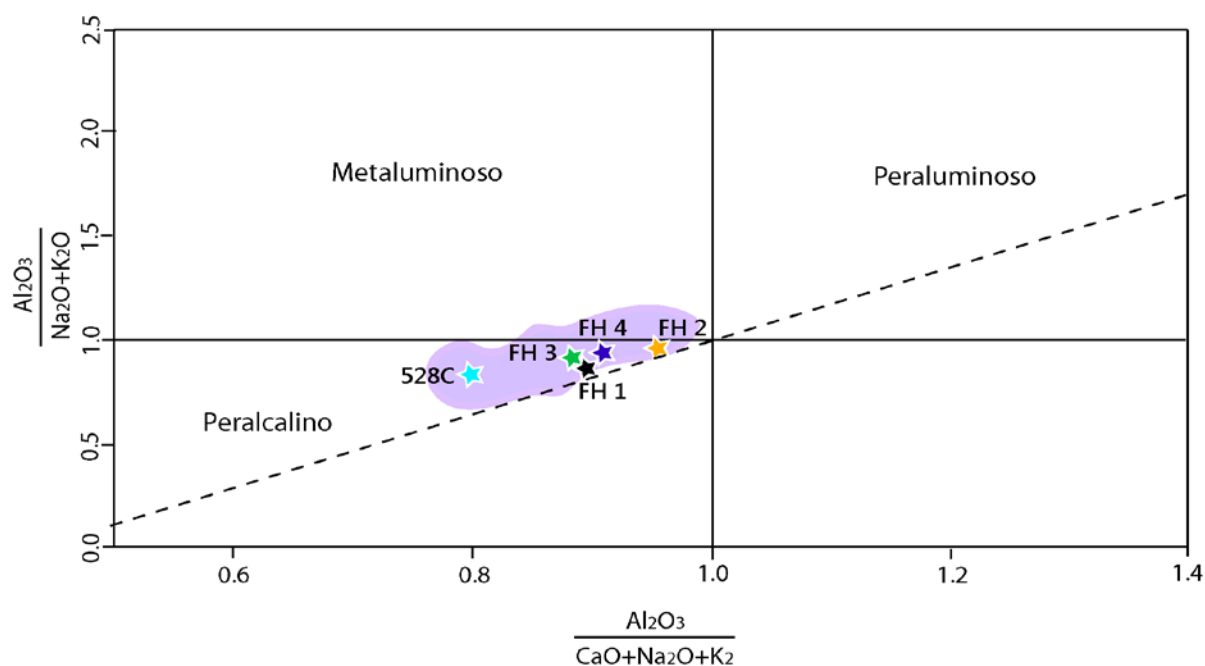


Figura 6.5: Diagrama de proporções moleculares  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$  versus  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$  de Maniar & Piccoli (1989), segundo os parâmetros gráficos de Shand (1943). A área em azul claro demarca área de abrangência das amostras de Cabral (2013).

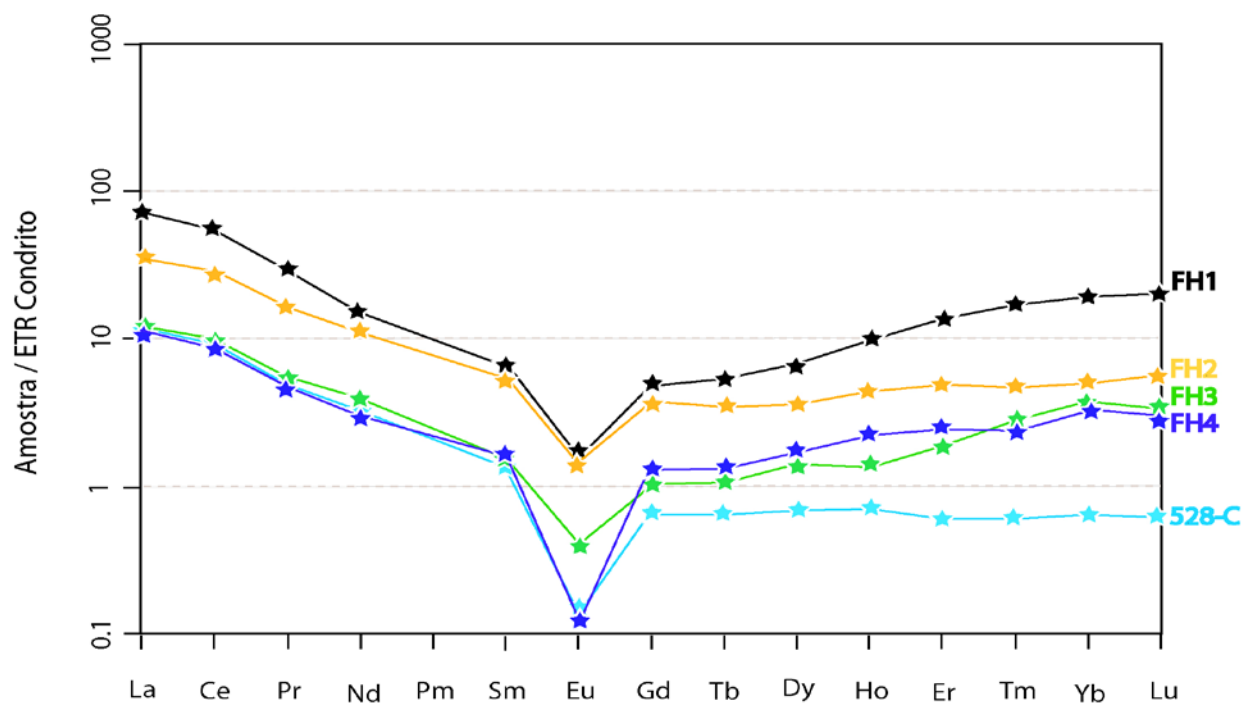


Figura 6.6: Diagrama multielementar de elementos terras raras normalizados pelo condrito segundo Boynton (1984).

Capítulo 7

# Considerações Finais

Discussões e Conclusões

### 7.1. Discussões

A transição entre sienitos e granulitos no stock Itaju do Colônia é caracterizada por pacotes de calcita, flogopitito e carbonatito inter-relacionados, sendo comuns a presença de xenólitos de sodalita azul, conforme relatado por Pimenta *et al.* (2012). Estruturas de fluxo e relações de contato sugerem a coexistência de três magmas distintos: (i) magma ultrapotássico composto essencialmente por flogopita e calcita, (ii) magma carbonatítico e (iii) magma fonolítico rico em cloro, cujas rochas tem sido foco de diversos estudos nos últimos anos.

Um aspecto comum nas rochas encontradas no SIC é a presença de grandes veios. Acredita-se que esses veios representam aberturas tensionais, formadas nos estágios tardio magmáticos, pelas quais os fluidos residuais do magma circulavam. A circulação dos fluidos seria responsável pelos processos de fenitização das rochas adjacentes.

Dados de isótopos de C e O obtidos em cristais de calcita (Rosa et al. 2005) evidenciam que os fluidos tardi-magmáticos, responsáveis pelos processos de fenitização, apresentam assinatura mantélica, assim como as rochas alcalinas que formam o *stock*. A interpretação desses dados sugere que o ambiente geoquímico permaneceu fechado durante todo processo de cristalização fracionada, ou seja, sem que houvesse contaminação por material crustal.

Intrusões alcalinas com injeção de veios carbonatíticos e margens fenitizadas, são relatados em diversas partes do mundo. (Castor 2008; Brown 1964; Denaeyer 1966; Druppel *et al.* 2005). A associação entre carbonatitos e rochas alcalinas vem se tornando bem estabelecida ao longo das últimas décadas. Diversos estudos (Maravic & Morteani 1980, Barker 1989, Bell & Keller 1995) apontam que rochas alcalinas associadas a carbonatitos, conforme ocorre no SIC, costumam apresentar significativos teores de elementos de terras raras e metais de transição, e os processos de alteração metassomática são um importante fator para concentração desses elementos (Clark 1984).

Os complexos alcalinos-carbonatíticos são os que abrangem o maior número de depósitos dessa natureza. Tais complexos constituem o ambiente geológico mais favorável para a formação de concentrações primárias ou depósitos residuais de minerais de ETR (Formoso *et al.* 1989). Durante as últimas décadas, diversos estudos têm abordado essa temática.

Loureiro *et al.* (1989), ao abordarem em seu estudo o complexo carbonatítico Barra do Rio Itapirapuã, relatam a presença de uma auréola de fenitização, resultante da interação por fluidos tardiomagmáticos. Tais fluidos seriam responsáveis pela mineralização de uma assembleia mineral composta por galena, fluorita, barita, sulfetos e minerais de ETR, como bastnasita, sinchisita e ancilita.

Processos metassômáticos estão intimamente associados a rochas peralcalinas com feldspatóides (Chakhmouradian & Zaitsev, 2012). De acordo com Peekov (2002), processos metassômáticos resultantes de fluidos ricos em Na e CO<sub>3</sub> seriam os principais responsáveis pelas mineralizações de ETR comumente relatadas nessas rochas.

Os padrões ETR obtidos neste estudo são bastante semelhantes aos padrões apresentados por Sial (1987). Em seu estudo, Sial analisou sete amostras de rochas fonolíticas, e os padrões obtidos revelaram que essas rochas, quando comparadas ao conteúdo dos condritos, eram bastante enriquecidas em ETR, havendo um alto fracionamento dos ETR leves e um moderado fracionamento dos ETR pesados.

## **7.2. Conclusões**

Os dados mineralógicos aqui apresentados evidenciam que as rochas analisadas no *Stock* Itaju do Colônia resultam dois processos, um magmático e outro metassomático.

A paragénese mineral resultante do processo magmático é representada por albita, ortoclásio, biotita, annita.



O processo metassomático é representado pela assembleia mineral composta por fluorita, bastnasita, ancilita, esfarelita.

Nota-se que grande parte dos minerais identificados apresentam composição rica em: nióbio (Nb), estrôncio (Sr), urânio (U), ítrio (Y), tório (Th), bário (Ba) e Terras Raras. Minerais acessórios como os encontrados em Itaju do Colônia são comuns em fenitos, carbonatitos e rochas associadas (Al-Ani & Sarapaa, 2014).

Dentre todos os minerais acessórios diagnósticos neste estudo, o pirocloro destaca-se pelo seu volume consideravelmente mais expressivo, em comparação com os demais minerais relatados. Sua identificação reveste-se de particular importância, pois além de raro, este é um mineral de minério comumente explorado para tecnologia de ligas especiais.

Os dados geoquímicos apresentados mostram que estes sienitos são fortemente fracionados ( $59 > \text{SiO}_2 > 43$ ) e têm altos teores de álcalis ( $14 < \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 22$ );  $1,4 < \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 13,8$ ; e  $19 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 29$ . Tratam-se de rochas peralcalinas com elevadas quantidades de Zr (até 1.520 ppm), Nb (até 470 ppm), Ta (até 79 ppm), Zn (75 ppm), Ce (44 ppm), La (22 ppm).

Os padrões de ETR são de 10 a 100 vezes mais enriquecidos do que condritos, e mostram uma forte anomalia negativa de Eu, a qual estaria relacionada ao fracionamento de feldspato. Esses mesmos espectros mostram graus de fracionamento modestos ( $4,6 < \text{La}/\text{Yb} < 31$ ).

Os elevados valores de Zr, Nb, Sr são característicos de rochas geradas por magmas alcalinos anorogênicos. Esse fato é compatível com o ambiente de rifte atribuído ao período de instalação da PASEBA no Cráton do São Francisco, quando houve a desfragmentação de Rodínia.

Rochas peralcalinas com feldspatóides são, sem dúvida, o tipo mais desafiador e mineralogicamente exótico dentre todos os produtos de magmatismo anorogênico. Nossa compreensão atual à respeito dos depósitos de ETR em rochas alcalinas com feldspatóides é muito fragmentária.

Estamos apenas começando a entender toda a complexidade dos processos mantélicos responsáveis pelo transporte de elementos terras raras. Ainda são raros os trabalhos experimentais que abordem as condições termodinâmicas associadas a processos metassomáticos nessas rochas.

Diante estes pressupostos, este é um campo de estudo bastante desafiador e gratificante aos pesquisadores que estiverem dispostos a abraçar o desafio.



# Referências Bibliográficas

- Al-Ani T. & Sarapaa O. 2014. REE-Minerals in carbonatite, alkaline and hydrothermal rocks, northern and central Finland. *European Rare Earth Resources Conference*. 333-342p.
- Armbruster T. & Gunter M.E. 2001. Crystal structure of natural zeolites. *In: Natural zeolites: occurrence, properties, applications*. Bish D.L., Ming D.W. (Eds.) *Mineralogical Society of America*. **45(1)**:1-68 p.
- Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Gieré R., Kartashov P.M. 2010. The pyrochlore supergroup of minerals: Nomenclature. *The Canadian Mineralogist*. **48**:673-698.
- Barbosa J.S.F. 1997. Síntese do conhecimento sobre a evolução geotectônica das rochas metamórficas arqueanas e paleoproterozóicas do embasamento do Cráton do São Francisco na Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*. **27(3)**:241-256.
- Barbosa J.S.F. & Sabaté P. 2004. Archean and Paleoproterozoic Crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: Geodynamic Features. *Precambrian Research*. **133**:1-27.
- Barbosa J.S.F., Mascarenhas J.F., Correa-Gomes L.C., Dominguez J.M.L., Souza J.S. (Eds.) 2012. *Geologia da Bahia Pesquisa e Atualização - vol.2*, 1. Ed. CBPM - Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Salvador, 559 p.
- Barbosa de Deus P. 1972. *Geologia da quadrícula de Camacã - Nordeste*. Salvador, CEPLAC, Boletim Técnico 18. 18 p.
- Boynton W.V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorites studies. *In: Henderson P. (Ed.) Rare Earth Elements Geochemistry. Developments in Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam. **2**:63-114.
- Brito Neves B.B., Cordani U.G., Torquato J.R.F. 1980. Evolução geocronológica do Pré-Cambriano do Estado da Bahia. *In: Inda H.A.V. & Duarte F.B. (eds.) Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*. Textos Básicos, 3, SME-CPM. P.:1-80.
- Burtseva M.V., Ripp G.S., Doroshkevich A.G., Viladkar S.G., Varadan R. 2013. Features of Mineral and Chemical Composition of the Khamambettu Carbonatites, Tamil Nadu. *Journal Geological Society of India*. **81**:655-664.
- Cabral E.B. 2008. Química mineral do *Stock* Foidolítico Itaju do Colônia, Sul da Bahia. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia, 61p.

Cabral E.B. 2013. Petrologia do *Stock* Litchfieldítico Itaju do Colônia, Sul da Bahia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.

Carpenter P., Edmunson J., Cohen B.A., Zeigler R.A., Jolliff B.L. 2011. First lunar occurrence of Keiviite-(Y) in troctolitic anorthosite 76335. *In*: 42nd Lunar and planetary science conference.

Chakhmouradian A.R., Zaitsev A.N. 2012. Rare earth mineralization in igneous rocks: sources and processes. *Elements*. **8**:347–353.

Chelgani S.C., Rudolph M., Leistner T., Gutzmer J., Peuker U.A. 2015. A review of rare earth minerals flotation: Monazite and xenotime. *International Journal of Mining Science and Technology*. **25(6)**:877–883.

Clark A.M. 1984. Mineralogy of the rare earth elements. *In*: Hendersen P. (Ed.) *Rare Earth Elements Geochemistry. Developments in Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam. **2**:33–61.

Conceição H. 1990. Pétrologie du Massif Syénitique d’Itiuba: Contribution à l’Etude Minéralogique des Roches Alcalines dans l’État de Bahia (Brésil). Thèse Doct. Université Paris-Sud, Centre d’Orsay, 395p.

Conceição H. 1993. Sienitos do Estado da Bahia: uma Epítome e Interpretação à Luz do Conhecimento Atual. II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco. SBG/BA. SGM, Anais, p.52-55.

Conceição H., Otero O. M. (Eds.) 1996. *Magmatismos Granítico e Alcalino no Estado da Bahia: uma epítome do tema*. Salvador: SGM 133 p.

Cordani U.G. 1973. Evolução geológica Pré-Cambriana da faixa costeira do Brasil, entre Salvador e Vitória. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 98 p.

Cox K.G., Bell J.D., Pankhurst R.J. 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. London: George Allen & Unwin Publisher. 450 p.

Cunha M.P. 2003. Litogeoquímica dos sítios mineralizados em sodalita azul do Maciço Rio Pardo e do Complexo Floresta Azul, Bahia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 88 p.

Currie K.L. 1976. The Alkaline Rocks of Canada. Geological Survey of Canada. 228 pp.

Daly R.A. 1910. Origin of the alkaline rocks. *Geological Society of America Bulletin*. **21**:87-118.

Dedavid B.A., Gomes C.I., Machado G. 2007. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras. Porto Alegre. EDIPUCRS. 60 p.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. (Eds.) 2013. *An Introduction to The Rock-Forming Minerals*. 3 Edition. The Mineralogical Society, London, 498p.

Droop G.T.R. 1987. A general equation for estimating Fe <sup>3+</sup> concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*. **51**: 431-435.

Drüppel K., Hoefs J., Okrusch M. 2005. Fertilizing processes induced by ferrocarnatite magmatism at Swartbooisdrif, NW Namibia. *Journal of Petrology*. **46**(2): 377–406.

Figueiredo M.C.H. 1989. Geochemical evolution of eastern Bahia, Brazil: A probable Early Proterozoic subduction related magmatic arc. *Journal of South American Earth Sciences*. **2**(2): 131-145.

Figueiredo M.C.H. & Barbosa J.S.F., 1993. Terrenos Metamórficos de Alto Grau do Cráton do São Francisco. II Simpósio do Cráton do São Francisco. In: Dominguez J.M.L. & Misi A. O Cráton do São Francisco. Salvador, SBG/SGM/CNPq. Publicação Especial. 213p.

Formoso M.L.L., Nardi L.V.S., Hartmann L.A. 1989. Geoquímica dos elementos terras-raras no Brasil. CPRM/DNPM, Sociedade Brasileira de Geoquímica. Rio de Janeiro. 152p.

Fujimori S. 1967. *Rochas alcalinas do sul do Estado da Bahia*. Rio de Janeiro, DNPM, Notas Preliminares e Estudos da Divisão de Geologia e Mineralogia, 14 p.

Fujimori S. 1978. Rochas alcalinas da Fazenda Hiassu, Itaju do Colônia, Bahia. Salvador, SBG-Núcleo Bahia-Sergipe, Publicação Especial. 117p.

Goldstein J.I. & Newbury D.E. (Eds.) 2003. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer Science. 3<sup>rd</sup> Edition. 690p.

Holmes A. 1950. Petrogenesis of katungite and its associates. *American Mineralogist*. **35**:772-792.

Janoušek V., Farrow C.M., Erban V. 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology* **47**(6):1255-1259.

- Kahn H. 2000. Microscopia Eletrônica de Varredura. Curso apostilado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 17p.
- Klein C. & Dutrow B. 2012. Manual de Ciências dos Minerais. 23ª edição. Artmed Editora S.A. Porto Alegre. 706 p.
- Le Maitre R.W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. *Recommendations of the IUGS Commission on the Systematics of Igneous Rocks*. Oxford: Blackwell.
- Lepage L.D. 2003. ILMAT: an excel worksheet for ilmenite magnetite geothermometry and geobarometry. *Computers & Geosciences*. **29(5)**:673-678.
- Maniar P.D. & Piccoli. P.M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*. **101**:635-643p.
- Maravic H.V. & Morteani G. 1980. Petrology and geochemistry of the carbonatite and syenite complex of Lueshe (N.E. Zaire). *Lithos*. **13**:159-170.
- Marinho M.M. 1991. La Séquence Volcano-Sédimentaire de Contendas-Mirante et la Bordure Occidentale du Bloco Jequié (Cráton du São Francisco, Brésil): um Exemple de Transition Archén-Proterozoïque. Tese de Doutorado, Univ. Blaise Pascal, Clermont Ferrand, França. 388p.
- Mascarenhas J.F. 1979. *Evolução geotectônica do Pré-cambriano do Estado da Bahia*. Salvador, SME/COM, Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia - Textos Básicos - Vol.2, 57-165p.
- Menezes R.C.L. 2005. Petrografia e geoquímica do maciço nefelina sienítico Rio Pardo, município de Potiraguá, sul da Bahia. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Sergipe. 169p.
- Morimoto N. 1989. Nomenclatura of Pyroxenes. *Canadian Mineralogist*. **27(1)**:143-156p.
- Nasraoui M. & Bilal E. 2000. Pyrochlores from the Lueshe carbonatite complex (Democratic Republic of Congo): a geochemical record of different alteration stages. *Journal of Asian Earth Sciences*. **18**:237-251.
- Nasraoui M., Toulkeridis T., Clauer N., Bilal E. 2000. Differentiated hydrothermal and meteoric alterations of the Lueshe carbonatite complex Democratic Republic of Congo identified by a REE study combined with a sequential acid-leaching experiment. *Chemical Geology*. **165**:109-132.

- Navickas A.A., Spokauskas A.A., Stuopys A. 2003. Factores that influence analcime formation. *Geologija Vilnius*. **42**:19-25.
- Neksavil H. & Burnham C.W. 1987. The calculated individual effects of pressure and water content on phase equilibria in the granite system. *The Geochemical Society*. Special Publication No.1, 433-446p.
- Nery M.A.C. & Da Silva E.A. 2001. *Rochas Ornamentais de 1988–2000*. Rio de Janeiro, DNPM, Balanço Mineral Brasileiro 2001, 44p.
- Oliveira A.E.L. 2003. Geologia, petrografia, litogeoquímica e idade Rb-Sr do Maciço Sienítico Itarantim, Sul do Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 110 p.
- Padilha A.V. & Melo R.C. 1991. Evolução Geológica. *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGGB): Folha Serinha (SC.24-Y-D-VI)*. Escala 1:100.000, Estado da Bahia, DNPM/CPRM, Brasília-DF. 121-149p.
- Paixão R.C. 2008. Caracterização petrográfica e geoquímica do Complexo Itapetinga, nos municípios de Potiraguá e Itarantim, Sul do Estado da Bahia. Trabalho de conclusão de curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 91p.
- Pedreira A.J. 1999. Evolução sedimentar e tectônica da bacia metassedimentar do Rio Pardo: uma síntese. *Revista Brasileira de Geociências*, **29**:339-344.
- Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Weidemann C.M., Pinto C.P. 2001. The Araçuaí- West Congo Orogen in Brazil: overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research*. **110**:307–323.
- Peixoto A.A. 2005. Aspectos geológicos, petrológicos e geoquímicos do plutonismo miasquítico Brasileiro da região sul do Estado da Bahia: Batólito Sienítico Itabuna. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 134p.
- Pimenta A.C.S., Conceição H., Rosa M.L.S., Martin R.F., Rios D.C. 2012. The Itaju do Colônia Sodalite Litchfieldite Stock, NE Brazil. In: Goldschmidt 2012 Conference Abstract.
- Pimenta A.C.S. 2013. Mineralogia Exótica no Stock Itaju do Colônia, Sul do Estado da Bahia. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Sergipe. 73p.



- Pimenta A.C.S., Conceição H., Rosa M.L.S. 2014. Mineralogia das vênulas brancas e do material afanítico preto em planos de fraturas em sodalititos de cor azul do Stock Itaju do Colônia, Bahia. *Scientia Plena* **10(5)**:1-8.
- Pimenta A.C.S., Conceição H., Rosa M.L.S. 2015. Pirocloro no Stock Itaju do Colônia, Sul do Estado da Bahia, Nordeste do Brasil. *Scientia Plena*. **11(1)**:1-6.
- Rosa M.L.S., Conceição H., Oberli F., Meier M., Martin H., Macambira M.J.B., Santos E.B., Paim M.M., Leahy A.S., Leal L.R.B. 2000. Geochronology (U-Pb/Pb-Pb) and isotopic signature (Rb-Sr/Sm-Nd) of the Paleoproterozoic Guanambi batholith, southwest Bahia state (NE Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*. 30(1):62-65.
- Rosa M.L.S., Conceição H., Macambira M.J.B., Marinho M.M., Marques L.S. 2003. Idade (Pb-Pb) e aspectos petrográficos e litogeoquímicos do Complexo Floresta Azul, Sul do Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*. **33**:13-20.
- Rosa M.L.S., Conceição H., Macambira M.J.B., Marinho M.M., Cunha M.P., Menezes R.C.L. 2004. Idade Pb-Pb e aspectos petrológicos da mineralização em sodalita azul no Maciço Nefelina-Sienítico Itarantim, Sul do Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Ciências*, **34(3)**:347-354.
- Rosa M.L.S., Conceição H., Menezes R.C.L., Macambira M.J.S., Galarza M.A., Oliveira E.C., Marinho M.M., Cunha M.P.da, Rios D.C. 2005a. Idade U-Pb da mineralização de sodalita-sienito (Azul-Bahia) no *Stock* Litchfieldítico Itaju do Colônia, sul do Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, **35(3)**:433-436.
- Rosa M.L.S., Conceição H., Macambira M.J.S., Menezes R.C.L., Cunha M.P.da, Rios D.C., Marinho M.M. 2005b. Magmatismo alcalino intraplaca Neoproterozóico no Sul do Estado da Bahia: O Batólito Nefelina-Sienítico Itarantim. *Revista Brasileira de Geociências*, **35(4 - Suplemento)**:47-58.
- Rosa M.L.S., Conceição H., Macambira M.J.S, Marinho M.M., Menezes R.C.L., Cunha M.P.da, Rios D.C. 2005c. Magmatismo neoproterozóico no sul do Estado da Bahia, Maciço Sienítico Serra das Araras: geologia, petrografia, idade e geoquímica. *Revista Brasileira de Geociências*, **35(1)**:111-121.
- Rosa M.L.S., Conceição H., Macambira M.J.B., Galarza M.A., Cunha M.P., Menezes R.C.L. Marinho M.M., Cruz Filho B.E., Rios D.C. 2007. Neoproterozoic anorogenic magmatism in the southern Bahia alkaline province of NE Brazil: U-Pb and Pb-Pb ages of the blue sodalite syenites. *Lithos*, **97(1-2)**: 88-97.

Santos R.A. & Souza J.D. 1985. *Projeto Mapas Metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais: Folha Serrinha (SD.24-Y-D)*. Escala 1:250.000. DNPM/CPRM. Salvador-Ba, 1:11p.

Santos C.N. 2008. Química Mineral e Petrografia do *Stock* Nefelina Sienítico Rio Pardo, Sul do Estado da Bahia. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia. 70p.

Santos J.J.A. 2013. Petrografia da Intrusão Sienítica do Complexo Alcalino Floresta Azul, Sul do Estado da Bahia. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Sergipe. 79 p.

Santos J.J.A., Rosa M.L.S., Conceição H. 2014. Primeira Ocorrência de Ancilita no Estado da Bahia: Mineral Acessório em Foid Sienitos do Complexo Alcalino Floresta Azul. *Scientia Plena*. **10(10)**:1-6.

Santos J.J.A., Pimenta A.C.S., Rosa M.L.S., Conceição H. 2015. Primeira ocorrência de zirconolita na Província Alcalina do Sul do da Bahia: intrusão sienítica do Complexo Alcalino Floresta Azul, Bahia, NE Brasil. *Scientia Plena*. **11(9)**:1-8.

Shand S. J. 1943. Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-Deposits with a Chapter on Meteorite. New York: John Wiley & Sons.

Shaoxing W.C., Nekvasil H. 1994. SolvCalc: An Interactive Graphics Program Package for Calculating the Ternary Feldspar Solvus and For two-Feldspar *Geothermometry*. *Computers & Geosciences*. **20(6)**:1025-1040.

Sial A.N. 1987. The terciary alkaline province of Fortaleza, state of Ceara, Brazil: Oxygen isotopes and REE geochemistry. *Geochem. Bras*. **1**:25-34.

Silva Filho M.A., Moraes Filho O., Gil C.A.A., Santos R.A. 1974. *Projeto Sul da Bahia, Folha SD.24-Y-D*. Convênio DNPM-CPRM, Relatório Final, 1, 164 p.

Souto P.G., Azevedo H.C. de A., Pedreira A.J. 1972. Geologia da Folha de Camacan-Sudoeste. Itabuna, CEPLAC, Boletim Técnico 20, 32p.

Sørensen H. 2001. Brief introduction to the geology of the Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland, and its exploration history. *In*: Sørensen, H. (ed.): The Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland: status of mineralogical research with new results. *Geology of Greenland Survey Bulletin*. 190:7–23.

SUDENE. 1977. Mapa topográfico escala 1:100.000, Folha Itaju do Colônia, SD.24-Y-D-II.

- Teixeira W., Kamo S.L., Arcanjo J.B.A. 1997. U-Pb zircon and baddeleite age and tectonic interpretation of the Itabuna Alkaline Suite, São Francisco Craton, Brazil. *Journal South American Earth Science*. **10(1)**:91-98.
- Thompson A.B. 1971.  $PCO_2$  in low-grade metamorphism: zeolite, carbonate, clay mineral, prehnite relations in the system  $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ . *In*: Contributions to Mineralogy and Petrology. Hoefs J. & Grove T.L. (Eds.) **33(2)**:145-161.
- Trompette R. *In*: Taylor & Francis (Eds.) 1994. *Geology of western Gondwana (2000-500 Ma): Pan-African Brasiliano Aggregation of South America and Africa*. Balkema A.A. & Rotterdam, Hardcover, 350 pp.
- Williams-Jones A.E., Migdisov A.A., Samson I.M. 2012. Hydrothermal mobilisation of the rare earth elements – a tale of ceria and yttria. *Elements*. **8**:355–360.



# Anexos

Anexo I: Análises químicas referentes a uma fase mineral rica em ETR presente em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3
Análise	Sp326-04	Sp318-04	Sp322-04	Sp307-04	Sp317-04	Sp319-04	Sp321-04	Sp327-04	Sp325-04	Sp309-04	Sp277-04	Sp323-04	Sp310-04	Sp324-04	Sp316-04	Sp308-04
Ag <sub>2</sub> O		2,1	1,8	2	1,9	2,2	3,3	1,2	2,1	1,4	1,9	1,7	2,3	2,5		1,1
CaO	1	1,2	1,9	2,3	1,2	1,2	1,4	1,1	1,4	1,3	1,1	1,6	1,4	1,3	1,6	1,4
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32	37,4	39,6	39,8	40,3	41,2	41,2	41,2	42,1	42,5	42,6	42,6	43	43	43,4	43,7
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16	18,5	20,2	19,3	15,1	19,2	17,1	18,7	20,5	22,5	20,8	21	21,9	20,4	20,3	27
Na <sub>2</sub> O	2,2															
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	23,8	13,5	6,3	7,6		2,9		2,5								
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	8,6	7,6	7,1	12,3	8,6	10	9,6	9,6	7,5	8,6	8,7	8	9,9	9,8	4,9
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,1	3,3	4	4,1	4,1	4,6	3,9	4,4	4,1	3,8	4,9	5,1	4,2	4,7	4,9	3,8
SiO <sub>2</sub>	1,4		1,6	1,2	2,6						1,9					
SrO	13	15,3	17,1	16,7	22,5	20,1	23	20,7	20,2	21,1	17,2	19,3	18,3	18,2	20,1	18,1
Total	99,5	99,9	100,1	100,1	100	100	99,9	99,4	100	100,1	99	100	99,1	100	100,1	100

Anexo II: Análises químicas referentes ao silicato de estrôncio e a uma fase mineral rica em estrôncio, possivelmente um carbonato, em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina	FH1	FH1	FH1	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH1	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH1	FH4
Análise	Sp162-12	Sp163-12	Sp189-12	Sp19-10	Sp58-10	Sp29-09	Sp16-10	Sp33-09	Sp190-12	Sp57-10	Sp59-10	Sp01-09	Sp69-10	Sp70-10	Sp28-10	Sp98-12	Sp29-10
Al2O3	11,7	11,4	2,1	7,7	9,4	6,8	1,3				4,7		0,7	3		2,6	
CaO	1,5	1,5	10	7,4	7	4,5	9,6	6,4	11,8	8,8	10,2	6,6	11,3	10,3	6,4	12,5	6,4
Ce2O3	11,9	13,4	19	5	8,8	12,9	4,7	5	21,6	8,1	11,6	20,6	5,7	4,4	16,6	11,3	15,5
FeO			0,8	8,6			6,9	22,6	0,9	5,9			4,1	3,2			
K2O				4,6	0,4		2,7				1,1						
La2O3	5,2	5,8	10,8		4,5	7,8		2,8	13,8	4,6	5,9	10,9	3,5	1,9	8,1	6	8,9
Na2O	13,6	11,7	12,8	14,5	8,8	14,4	15	11,3	6	14,4	7	6,3	13,5	13,2	9,8	7,3	11,3
Nd2O3	3	2,5	3,6		2,4	2,9		1,4	4,8	2	1,7	5,7	1,2	1,2	4,4	2,7	4,1
Pr2O3	1,3		1,7						1,5	1,3		1,9			1,6		
SiO2	37,6	37	4,9	10,7	18,4	18					9,6		2,1	5,8		6,2	
SrO	14,2	15,3	16,8	17,4	20,2	20,5	21,1	24	24,3	25,3	27,3	27,8	29,1	29,3	32,4	32,7	32,9
ThO2			1,3	8,6	6,5		11,6	6,4	2	9,1	8,4		6,8	4,7		2,3	
WO3							4										
Y2O3														1,1		2	
Total	100	100	83,8	84,5	86,4	87,8	76,9	79,9	86,7	79,5	87,5	79,8	78	78,1	79,3	85,6	79,1

Anexo II: Análises químicas referentes ao silicato de estrôncio e a uma fase mineral rica em estrôncio, possivelmente um carbonato, em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina	FH4	FH4	FH1	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4
Análise	Sp34-09	Sp35-09	Sp97-12	Sp31-10	Sp30-10	Sp35-10	Sp38-10	Sp39-10	Sp36-10	Sp37-10	Sp61-10	Sp34-10	Sp32-10	Sp33-10	Sp71-10	Sp72-10	Sp60-10
Al2O3																	
CaO	9,9	12	16,5	15,1	15,1	15	15,1	16,2	15,7	14,8	17,1	15,3	16,9	16,2	14,3	15,8	19,6
Ce2O3	8	2,9	10,3				2	1,4	1,5	3,7	5,7			1,3			
FeO	1,4	9,9									1,2						
K2O																	
La2O3	3,9	1,2	5,2							2	2,5						
Na2O	10,4	12,3	1,3	11,8	9,8	9,7	10,4	10,2	9,8	10,1	16,7	9,8	10	10	11,9	11,5	9,4
Nd2O3	1,7		3,3								1,6						
Pr2O3																	
SiO2																	
SrO	33,9	35,8	39,3	44,8	45,5	45,8	46	46,4	46,2	46,2	46,7	46,8	47,1	47,4	47,5	48,3	49
ThO2	9,9	4,1	3	4,6	6,2	5,5	3,3	2,9	2,2	2	8,1	4,9		2,5			
WO3																	
Y2O3			2,9			1,6			1,5								
Total	79,1	78,2	81,8	76,3	76,6	77,6	76,8	77,1	76,9	78,8	99,6	76,8	74	77,4	73,7	75,8	78

Anexo III: Análises químicas referentes a uma fase mineral rica em óxido de estrôncio presente em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina Análise	FH3 Sp278-04	FH3 Sp341-04	FH3 Sp339-04	FH3 Sp328-04	FH3 Sp340-04	FH3 Sp338-04	FH3 Sp337-04	FH3 Sp330-04	FH3 Sp335-04	FH3 Sp332-04	FH3 Sp333-04	FH3 Sp279-04	FH3 Sp331-04	FH3 Sp334-04	FH3 Sp336-04	FH3 Sp329-04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	10,5	9,9	8,7	9,4	8,6	8,4	8,2	1,1	7,6	8,4	6,3	2,2	8,1	0,9	
CaO	8,8	12	13,6	14,9	11,7	14,3	15,1	15,4	13,5	12,9	12,9	13,7	13,1	13	13,3	7,3
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>																11,4
FeO																6,6
K <sub>2</sub> O																
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4	4,4	4,6	5,1	4,2	4,8	5,2	6,3	5,2	5	4,6	5,9	4,6	5,6	5,4	4,4
Na <sub>2</sub> O	9	9,2	10,6	8,7	15,5	11,5	10	9,6	14,9	18,4	17	17,1	16,2	17,9	18	17,1
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,1	2,9	3	3,4	2,7	2,9	3,6	3,4	3,6	3,1	3,4	3,2	3,5	2,8	3,3	3,3
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				1,7		1,9	1,9	1,9	1,5		1,6	1,7				
SiO <sub>2</sub>																
SrO	63,6	60,9	58,3	57,4	56,5	56,1	55,8	55,3	52,6	52,3	52,4	52,2	51,9	51,8	50,3	49,9
ThO <sub>2</sub>																
WO <sub>3</sub>																
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>																
Total	98,9	99,9	100	99,9	100	100,1	100	100,1	100	100,1	100,1	100,1	100	99,2	99,6	100



Anexo III: Análises químicas referentes a uma fase mineral rica em óxido de estrôncio presente em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina	FH4	FH1	FH4	FH4	FH4	FH4	FH4	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1
Análise	Sp61-10	Sp95-12	Sp27-10	Sp26-10	Sp25-10	Sp24-10	Sp23-10	Sp96-12	Sp71-08	Sp191-12	Sp195-12	Sp55-10	Sp72-08	Sp73-08	Sp162-12	Sp163-12	
Al2O3		1,8						1,7							11,7	11,4	
CaO	17,1	19,6	7,4	7,3	7,5	7,1	7	19,7	11,8	21,8	22,4	10,9	11,1	11,5	1,5	1,5	
Ce2O3	5,7	11,4	20,1	20,7	20,7	21,5	19,8	15	11,6	13,8	16	10,1	14,2	13,8	11,9	13,4	
FeO	1,2							4,4				5,7	5,9	8,4			
K2O				12,3	11,5	10,9	10,2									1,4	
La2O3	2,5	6	11,7					8,3	4,4	7,8	8,6	6,8	6,2	4,6	5,2	5,8	
Na2O	16,7	4	13,3	12,5	13,3	14,3	16,4	5,3	20,8	6,4	2	18,3	20,9	20,5	13,6	11,7	
Nd2O3	1,6	3,6	6,3	6,2	6,5	6,3	7,5	3,7	5,1	4,6	5	2,6	4,3	5	3	2,5	
Pr2O3			2,1	2,2	1,9	2	1,6								1,3		
SiO2															37,6	37	
SrO	46,7	50,1	39	38,7	38,4	37,8	37,4	36,9	35,5	34,4	34,2	33,9	32,8	31	14,2	15,3	
ThO2	8,1								6,4	6,6	6,6	11,1	4,6	5,3			
WO3								9,3									
Y2O3		3,5								4,7	5,2						
Total	99,6	100	99,9	99,9	99,8	99,9	99,9	99,9	100	100,1	100	99,4	100	100,1	100	100	

Anexo IV: Análises químicas de uma fase mineral rica em ferro e manganês presente em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina	FH4	FH4	FH4	FH4	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1	FH1
Análise	Sp66-10	Sp62-10	Sp68-10	Sp12-10	Sp67-10	Sp154-12	Sp147-12	Sp145-12	Sp146-12	Sp147-12	Sp154-12	Sp155-12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,2	1,3			0,9	1,5	2,1	1,6	1,8	2,1	1,5	1,1
CaO	1	1,8	6,4	1,4	1	3,4	3,3	3,6	3,2	3,3	3,4	3,3
FeO	65	74,1	45,3	67,9	62,4	40,7	14,6	15,6	13,6	14,6	40,7	40,6
MgO	2	3	0,8		1,3					1,4	0,4	
MnO	16	18,1	20,1	30,6	32,4	53,2	73,2	74,9	75,8	73,2	53,2	53,9
K <sub>2</sub> O						0,4	1,4	0,6	1,1			0,4
Na <sub>2</sub> O	3,1											
SiO <sub>2</sub>	8,8	1,9	0,6		1,7	0,7	5,4	3,5	4,5	5,4	0,7	0,8
Total	100,1	100,2	73,2	99,9	99,7	99,9	100	99,8	100	100	99,9	100,1

Anexo V: Análises químicas de uma fase mineral rica em tálio e cobre presente em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2
Análise	Sp99-11	Sp100-11	Sp101-11	Sp102-11	Sp103-11
Al	2	1,5		3,3	
Cu	22	23,7	25,2	21	26,8
Fe	5,6	5,8	6	6,2	6,9
Mn	2,1	0,8	0,7	1,3	0,7
Si	1,9	2,3		6,3	
S				12,9	13,9
Tl	56,6	58,1	63,8	36,9	46
O	9,9	7,8	4,3	12,1	5,7
Total	100,1	100	100	100	100

Anexo VI: Análises químicas referentes aos silicatos de ítrio e itérbio presente em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina Análise	FH2 Sp 48-11	FH2 Sp 49-11	FH1 Sp 10-12	FH1 Sp 11-12	FH1 Sp 27-12	FH1 Sp 28-12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,6	5,4			18,1	17,6
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			3,5	3,3	3,4	2,2
Dy			3,3	3,5		
FeO	0,8	1,2	5,3	6	2,2	2
Gd			2,6			
MnO	2	1,4				
Na <sub>2</sub> O	3,5	2,9	0,9	0,9	8,8	7
Nb <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	35,9	37,6				
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			3,5	3,3		
SiO <sub>2</sub>	20,8	18,5	33,6	34	51,8	49,6
ThO <sub>2</sub>	6,5	5,7				
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,4	20,9	38,5	39,2		
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,2	3,6	4	3,4	15,7	15,6
Total	100,2	99,9	95,2	93,6	100	94

Anexo VII: Análises químicas referentes a fases minerais ricas em tório presentes em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina	FH4	FH4	FH4	FH4	FH2	FH2	FH2
Análise	Sp 22-10	Sp 73-10	Sp 74-10	Sp 75-10	Sp 106-11	Sp 107-11	Sp 108-11
Al2O3	2,6	2,1	2,1	2,6	2,2	2	1,9
CaO	2,6	1,7	1,7	1,3	2,3	1,5	1,3
Ce2O3	6,4	4,9	4,1	3,3			
Cl		1,4	0,8	0,7			
FeO	3,1	24,2	40,8	44,8		1	
MnO		1,7	2,1	1,7	6,2	5,9	10,5
Na2O	4	1,5	1,9	2,7		0,8	0,8
SiO2	17,3	12,4	10	7,3	23,3	23,6	22,2
SrO	7,1	2,4					
ThO2	47,9	30	23,2	18,7	56,5	54	55
WO3				3,5			
Y2O3		3			9,2	11,1	8,3
Yb2O3	5						
Total	96	85,3	86,7	86,6	99,7	99,9	100

Anexo VIII: Análises químicas referentes a fases minerais ricas em nióbio e tungstênio presentes em rochas do Stock Itaju do Colônia.

Lâmina	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH3	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2	FH2
Análise	Sp229-4	Sp233-4	Sp355-4	Sp19-5	Sp20-5	Sp39-5	Sp40-5	Sp66-11	Sp67-11	Sp68-11	Sp83-11	Sp84-11	Sp85-11	Sp114-11	Sp127-11	Sp128-11	Sp129-11
CaO	7,4	6,9	8,1	7,4	5,8	4,8	8,5	6,8	8,5	8,1	8,9	9,6	10	6,6	6,4	6,7	6,2
Ce2O3	3,3	2,6	3,5	4	2,8	3,5	2,7	4,3	2,8	2,1	2,1	2	1,7		1,9	1,3	1,3
F	3,9	4,3	4,8	4,3	0,8	0,8	4,5	4	4,2	3,9					4,4	4,3	5,1
FeO	1,6	1,3	0,8					2	2,1	2,4				3	3,2	2,8	3,6
La2O3			2	1,9				2,2									
Na2O	7,4	7,6	8,3	5,4	3,9	2,9	6,2	9,5	9,5	9,3	9,7	9,9	9,7	10,5	10	10,5	10,6
Nb3O5	47,1	48,5	52,9	49	62,4	63,1	54,4	51,2	54,2	50,9	55,3	56,5	55	31,6	34,6	33,3	32,6
Nd2O3								1,1									
SiO2	2,3			2										3,8			
SrO				4													
Ta2O5					3,9	3,4		0,6									
TiO2	6,9	7,2	5,2	6,4	4,1	3,3	5,3	2,8	1,7	1,9	2,1	2,1	2,1	3,9	3,8	3,5	3
UO2	3,4	3,5		2,7	4	3,7	2,1										
WO3	16,6	17,9	14,2	12,9	12,2	11,5	16,3	15,4	16,3	21,1	16,7	14,8	17,1	35,9	39,6	41	39,7
Total	99,9	99,8	99,8	100	99,9	97	100	99,9	99,3	99,7	94,8	94,9	95,6	95,3	103,9	103,4	102,1